

Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías
Industriales
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Desarrollo de un modelo para el cálculo de las temperaturas en una nave industrial”

César Alberto Mardomingo Alonso

Tutor

Fernando Hernández Jiménez

Leganés, 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

RESUMEN

En este proyecto de fin de carrera se expondrá un modelo matemático programable para el cálculo del desarrollo de las temperaturas en una nave industrial sin climatizar, con la finalidad de poder desarrollar una herramienta que permita conocer su comportamiento térmico de forma simple, rápida e intuitiva. El modelo será realizado mediante un análisis de la transferencia de calor en régimen permanente de intervalos horarios, considerando a su vez el cambio de energía interna en los diferentes sistemas. Posteriormente, este modelo será aplicado en un entorno de programación para extraer conclusiones de un caso práctico y mostrar así su funcionamiento. Gracias al análisis en profundidad de la transferencia de calor por radiación se podrá demostrar la importancia de los acabados superficiales en el acondicionamiento térmico.

Palabras Clave: Desarrollo de las temperaturas, cargas térmicas, transferencia de calor por radiación, programa de cálculo, naves industriales.

ABSTRACT

In this bachelor thesis, a mathematical programmable model will be exposed for the calculation of the temperature development in an industrial building without air conditioning, with the purpose of being able to develop a tool which allows to know its thermal behavior in a simple, fast and intuitive way. This model will study the heat transfer in steady state for periods of one hour, taking into account the change of internal energy in any of the systems. Later on, this model will be coded into a programming environment in order to extract conclusions from a practice example and show how the program works. Thanks to the deep analysis of the thermal radiation, it will be possible to demonstrate the importance of the superficial layer as a thermal insulation for buildings.

Keywords: Temperature development, thermal loads, thermal radiation, calculation program, industrial building.

DEDICATORIA

A mis Padres, J. Antonio Mardomingo y Mercedes Alonso, por haberme ayudado y apoyado en todo momento, pero sobre todo por su amor incondicional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción al proyecto.....	1
1.2. Motivación del proyecto.....	2
1.3. Objetivo.....	2
1.4. Trabajos previos	2
1.5. Características del proyecto	3
1.5. Materiales	3
1.6. Método e hipótesis iniciales	4
1.7. Estructura del proyecto.....	5
2. CONCEPTO DE CONSTRUCCIÓN INDUSTRIAL	6
2.1. Introducción a la nave industrial	6
2.2. Tipos de estructuras industriales	6
2.3. Cerramientos	9
2.4. Cargas térmicas	15
3. VARIABLES DE ENTRADA	17
3.1. Dimensiones y orientación de la nave.....	17
3.2. Materiales de la cubierta y de las paredes	18
3.3. Localización y datos climáticos asociados.....	21
3.4. Cargas internas	24
4. TRASMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN.....	30
4.1. Fundamentos teóricos.....	30
4.2. Descripción práctica.....	32
5. TRASMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN.....	37
5.1. Fundamentos teóricos.....	37
5.2. Descripción práctica.....	39
5.2.1. Convección exterior	39
5.2.2. Convección interior	43
6. TRASMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN	44
6.1. Fundamentos teóricos.....	44
6.2. Descripción práctica.....	48
6.2.1. Radiación exterior	48
6.2.2. Radiación interior.....	56

7. BALANCE TÉRMICO.....	60
7.1. Fundamentos teóricos.....	60
7.2. Descripción práctica.....	62
7.2.1. Calor almacenado.....	62
7.2.2. Balances térmicos en los cerramientos.....	66
7.2.3. Balance térmico global.....	68
8. VARIABLES DE SALIDA Y CASO PRÁCTICO.....	70
8.1. Variables de salida	70
8.2. Funcionamiento básico del archivo ejecutable.....	79
8.3. Ejemplo de toma de decisiones constructivas	82
9. CONCLUSIONES FINALES DEL PROYECTO.....	89
9.1. Conclusiones	89
9.2. Desarrollo futuro	89
BIBLIOGRAFÍA.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Pórtico de cubierta plana [4].....	7
Figura 2.2: Pórtico de cubierta curva [4].....	7
Figura 2.3: Pórtico Mansard [4].....	7
Figura 2.4: Pórtico de viga aligerada [4].....	8
Figura 2.5: Pórtico de inercia variable [4].	8
Figura 2.6: Pórtico de cercha.	8
Figura 2.7: Unión de dos pórticos por uno de sus pilares [4].	9
Figura 2.8: Estructura principal [5].....	9
Figura 2.9: Chapa metálica grecada [6].	10
Figura 2.10: Perfil de chapa grecada y minionda con diferentes colores de prelacado [7].....	10
Figura 2.11: Panel Sandwich PUR con perfil grecado [8].	11
Figura 2.12: Cubierta deck [9].	12
Figura 2.13: Panel alveolar de hormigón prefabricado [10].	13
Figura 2.14: Construcción de una fachada de paneles de hormigón prefabricado [11].	14
Figura 2.15: Bloque de hormigón prefabricado [12].	14
Figura 3.1: Dimensionado y orientación de la nave.....	18
Figura 3.2: Fracción de ganancias de calor sensible en función del metabolismo, para las distribuciones reales y los modelos ajustados.	27
Figura 4.1: Flujo de calor por conducción unidimensional en pared plana.	30
Figura 4.2: Conducción unidimensional en pared plana compuesta con circuito en serie equivalente.	31
Figura 4.3: Banda de aislamiento perimetral [28, Fig. 1].	34
Figura 4.4: Ajuste del modelo potencial a los datos tabulados del coeficiente de transmisión .	35
Figura 5.1: Transferencia de calor por convección.	37
Figura 5.2: Dirección del viento establecida para cada cerramiento (Nave vista desde el cielo).	40
Figura 5.3: Desarrollo del coeficiente de convección externo para distintas velocidades.	41
Figura 5.4: Delimitación de la figura 5.3 mostrando las regiones con régimen laminar, mixto y turbulento.	42
Figura 6.1: Desarrollo de la irradiación cuando incide en una superficie semitransparente.....	44
Figura 6.2: Factor de forma para paredes paralelas y alineadas	46
Figura 6.3: Factor de forma para paredes perpendiculares con una orilla común.	47
Figura 6.4: Descripción de la orientación de una nave industrial respecto al sol.	48
Figura 6.5: Cartas estereográfica en coordenadas cartesianas para el municipio de Leganés, Madrid (SunEarthTools [29]).....	49
Figura 6.6: Factor de forma para rectángulos paralelos con una orilla común. (Incropera [#]).	50
Figura 6.7: Factor de forma $FP1T$ y $FP2T$ en función de la longitud del terreno para una nave pequeña (40 x 5 x 4m).....	51
Figura 6.8: Factor de forma $FP1T$ y $FP2T$ en función de la longitud del terreno para una nave grande (1000 x 400 x 30 m).	52
Figura 7.1: Conservación de la energía en un volumen de control.	60
Figura 7.2: Conservación de la energía para un cerramiento.....	66

Figura 7.3: Conservación de la energía para un cerramiento mediante el uso de dos volúmenes de control adyacentes.	67
Figura 7.4: Flujo de calor para el cerramiento del suelo.	68
Figura 8.1: Desarrollo de la temperatura exterior y de la temperatura ambiente media del interior de la nave.	70
Figura 8.2: Intercambio de calor necesario para trasladar la temperatura ambiente a la temperatura de consigna (proceso de refrigeración).	71
Figura 8.3: Intercambio de calor necesario para elevar la temperatura ambiente a la temperatura de consigna (proceso de calefacción).	74
Figura 8.4: Consumo del equipo de climatización.	75
Figura 8.5: Comparación de la temperatura de consigna y la temperatura ambiente.	75
Figura 8.6: Transferencia de calor por conducción en los cerramientos.	76
Figura 8.7: Transferencia de calor por radiación en las superficies exteriores de los cerramientos.	76
Figura 8.8: Transferencia de calor por radiación en las superficies interiores de los cerramientos.	77
Figura 8.9: Transferencia de calor por convección en las superficies exteriores de los cerramientos.	77
Figura 8.10: Transferencia de calor por convección en las superficies interiores de los cerramientos.	78
Figura 8.11: Temperaturas medias de las superficies exteriores de los cerramientos.	78
Figura 8.12: Temperaturas medias de las superficies interiores de los cerramientos.	79
Figura 8.13: Calor almacenado en cada cerramiento.	79
Figura 8.14: Desplegable del botón Windows de la barra de herramientas.	80
Figura 8.15: Pantalla principal con los valores por defecto establecidos (Diagram Windows).	80
Figura 8.16: Desplegable del botón Plot de la barra de herramientas.	81
Figura 8.17: Ventana de New Plot Window X-Y Plot.	82
Figura 8.18: Variables de entrada para el caso de estudio.	84
Figura 8.19: Desarrollo de la temperatura ambiente antes de la reforma.	84
Figura 8.20: Configuración de la opción 1.	85
Figura 8.21: Configuración de la opción 2.	85
Figura 8.22: Gráfica comparativa de la temperatura ambiente.	86
Figura 8.23: Gráfica comparativa de la temperatura superficial inferior y superior en la cubierta.	86
Figura 8.24: Gráfica comparativa del consumo que supondría climatizar la nave.	87

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1: PROPIEDADES DE LOS MATERIALES SELECCIONADOS PARA LOS CERRAMIENTOS	19
TABLA 3.2: PROPIEDADES DE LOS ACABADOS SUPERFICIALES SELECCIONADOS PARA LOS CERRAMIENTOS	20
TABLA 3.3: ZONAS CLIMÁTICAS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA (DB-HE CTE [2]) ...	21
TABLA 3.4: ZONAS CLIMÁTICAS DE LAS ISLAS CANARIAS (DB-HE CTE [2])	22
TABLA 3.5: VELOCIDAD DEL METABOLISMO SEGÚN LA ACTIVIDAD	25
TABLA 3.6: GANANCIAS DE CALOR DEBIDA A LOS OCUPANTES (CARRIER [26, PARTE 1, TABLA 48])	26
TABLA 4.1: TRANSMITANCIA TÉRMICA U_s (W/m ² K) [28, Tabla 3]	34
TABLA 4.2: COMPARACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN TABULADO EN EL CTE Y EL MODELO AJUSTADO.	35
TABLA 8.1: COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS PARA LA PRE-REFORMA, OPCIÓN 1 Y OPCIÓN 2.	87
TABLA 8.2: COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS PARA LA OPCIÓN 2 Y OPCIÓN 3	88

SÍMBOLOS

A – area, m^2

B' – parámetro característico de la solera, m

c – calor específico, $J/kg\ K$

c_p – calor específico a presión constante, $J/kg\ K$

E – potencia emisiva, W/m^2 ; energía interna térmica, J

\dot{E} – potencia, W

e – espesor de una pared, m

F – Factor de forma

f – fracción de ganancias de calor sensible por ocupación, $W_{sensible}/W_{total}$

G – irradiación, W/m^2

h – coeficiente de transferencia de calor por convección, $W/m^2\ K$

h_{fg} – calor latente de evaporación, J/kg

J – radiosidad, W/m^2

k – conductividad térmica, $W/m\ K$

L – longitud característica, m

n – cantidad o número de elementos asociados, "elemento"

P – perímetro, m

Q – transferencia de energía, J

q – transferencia de calor, W

q'' – flujo de calor, W/m^2

R – Resistencia térmica, $m^2\ K/W$

rev – número de renovaciones del aire, h^{-1}

T – temperatura, K

t – tiempo, s

U – coeficiente global de transferencia de calor, $W/m^2\ K$; energía interna, J

V – volumen, m^3

v – velocidad, m^2/s

w – humedad absoluta $kg_{H_2O}/kg_{aire\ seco}$

Letras griegas

α – *absortividad*

ε – *emisividad*

ν – *viscosidad cinemática, m²/s*

θ – *ángulo de orientación de la pared de menor área respecto al sur, °*

ρ – *densidad, kg/m³; reflectividad*

τ – *transmisividad*

ω – *ángulo de compensación del Azimut en superficies verticales, °*

SubíndicesSubíndice tipo 0: General

abs – *valor absoluto*

cr – *valor crítico*

i – *denominación de diversas especies*

max – *valor máximo*

med – *valor promedio*

min – *valor mínimo*

rel – *valor relativo*

Subíndice tipo 1: Condición de energía

alm – *calor almacenado*

cond – *transmisión de calor por conducción*

conv – *transmisión de calor por convección*

ent – *energía entrante de un volumen de control*

gen – *energía generada en un volumen de control*

rad – *transmisión de calor por radiación*

sale – *energía saliente de un volumen de control*

Subíndice tipo 2: Condición de material

C – *cerramiento de la Cubierta*

P – *cerramientos de las Paredes*

P1 – *Pared de menor área*

P2 – *Pared de mayor área*

PE – *Pared Este*

PN – Pared Norte

PO – Pared Oeste

PS – Pared Sur

S – cerramiento del Suelo

T – Terreno circundante al edificio

Subíndice tipo 3: Condición de lugar

air – condiciones del aire

alr – alrededores

amb – condición del aire ambiente interior de un edificio

ext – todo aquello que se encuentre en el exterior de la nave o limitandolo

int – todo aquello que se encuentre en el interior de la nave o limitandolo

sup – superficie

∞ – condiciones de los alrededores

Subíndice tipo 4: Condición carga térmica

AC – acondicionamiento del aire (Air Conditioning).

CI – Cargas Internas

calef – proceso de calefacción

elec – equipos electrónicos

ilum – iluminación

maq – maquinaria

ocup – ocupación

pers – personas

refri – proceso de refrigeración

vent – ventilación

Constantes

$\sigma = 5,67 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$ – constante de Stefan– Boltzmann

En el caso del uso de algún otro tipo de nomenclatura será aclarada en su misma sección.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción al proyecto

En este proyecto, se expondrá un modelo matemático para el cálculo del desarrollo térmico de una nave industrial sin equipos de climatización. Para poder comprender que ha impulsado su realización hay que introducir un concepto previo, el concepto de bienestar.

El bienestar según Neila [1] *“es el resultado de la interpretación que hace el cerebro de factores extrínsecos (la temperatura, la humedad, el ruido, etc.) e intrínsecos (estados de salud, hambre, sed, cansancio, estrés, etc.) al individuo, somáticos y psicosomáticos”*. La interpretación de la combinación compleja de todos los factores extrínsecos e intrínsecos derivan en una sensación de bienestar o de incomfortabilidad. Estos estadios determinan la manera de actuar y relacionarse del ser humano en cada momento debido a que siempre va a buscar de forma inconsciente la sensación de bienestar. De ahí que se trate de un concepto fundamental que hay que tener en cuenta para la concepción y diseño del entorno. Este proyecto se centrará en los factores extrínsecos, ajenos al individuo, en concreto en el ambiente higrotérmico.

La sensación de bienestar higrotérmico de un individuo se consigue mediante el acondicionamiento de su entorno con el fin de obtener un metabolismo estable, como puede ser mediante la utilización de más o menos prendas o el acondicionamiento del aire que le rodea. Sin embargo, los parámetros que provocan esta sensación no se pueden controlar o no es razonable para muchos casos (la temperatura ambiente, la radiación solar, la velocidad del aire, la humedad, etc.). Un ejemplo claro de esto son las naves industriales, espacios interiores muy grandes, poco aislados, sin climatización del aire y sometidos a altas variaciones térmicas. Por otro lado, existen edificios que para conseguir un ambiente térmico adecuado consumen desmesuradas cantidades de energía, lo cual se traduce en contaminación y en sus respectivas consecuencias. Por esto mismo, en la última década se ha estado persiguiendo una utilización inteligente de los recursos, desde la ampliación de las normativas que regulan la demanda energética de los edificios, hasta el desarrollo y mejora de productos o servicios para conseguirlo, como los aislantes térmicos, el uso de fuentes de energía renovables o equipos de climatización más eficientes.

Como ya adelantábamos, las naves industriales normalmente tienen un acondicionamiento térmico muy pobre, el cual sufren los empleados que trabajan en ella. Una sensación de malestar térmico puede provocar un descenso del rendimiento de los trabajadores e incluso que se tenga que detener la actividad por descansos bajo normativa del ambiente higrotérmico. Por ejemplo, en un clima como el de Madrid, en verano se pueden llegar a alcanzar temperaturas ambiente superiores a 35 °C en naves con poco aislamiento, lo que provoca frecuentes parones y descansos de la actividad industrial. Estas situaciones afectan de forma negativa al estado de los trabajadores y a la rentabilidad de una empresa por lo que es importante evitarlas. Este proyecto se centrará

de forma concreta en calcular las condiciones térmicas para adquirir una perspectiva más amplia antes de la toma de decisiones sobre un proyecto de acondicionamiento de una nave industrial. En primer lugar, se desarrollará un modelo matemático basado en las leyes más elementales de la transferencia de calor y de la termodinámica. Más tarde, este modelo será aplicado a un entorno de desarrollo integrado con el fin de crear un programa de cálculo.

1.2. Motivación del proyecto

La realización de este proyecto se debe al interés personal por el desarrollo de una herramienta que sirva de ayuda a la hora de tomar decisiones sobre el acondicionamiento térmico de un edificio.

1.3. Objetivo

El objetivo de este proyecto es desarrollar un modelo matemático programable que permita conocer y evaluar el comportamiento térmico de una nave industrial de forma simple, rápida e intuitiva.

1.4. Trabajos previos

Prácticamente todos los trabajos previos de mayor relevancia se basan en el cálculo de las cargas térmicas con el fin de dimensionar los equipos de climatización y estimar la demanda y el consumo energético, por lo que están dirigidos a todo tipo de edificaciones climatizadas. Podemos diferenciar programas estatales como el EnergyPlus y el DoE de Estados Unidos o el CALENDER y LIDER de España y los programas comerciales, como el Carrier, Saunier o Ferroli. que por lo general están patrocinados por empresas de climatización. Por otro lado, también podemos encontrar programas como el CE3X que calculan la eficiencia energética de los edificios.

A diferencia de este modelo, los cálculos de la transferencia de calor por radiación y convección suelen hacerse de forma conjunta mediante el uso de resistencias superficiales equivalentes o temperaturas exteriores equivalentes, sin tener en cuenta la variación de las mismas a lo largo del día (como propone el Código Técnico de la Edificación, CTE) o la diversidad de los acabados superficiales (solo consideran una gama de color claro, medio y oscuro). El modelo de cálculo expuesto en este trabajo realizará un estudio de la transferencia de calor superficial más a fondo para poder estudiar mejor la influencia de los aislamientos de radiación.

En estos programas, en las pérdidas de calor por el suelo solo se tiene en cuenta la transferencia de calor al aire exterior. Mientras que, en este programa, además de las pérdidas al exterior, el suelo y los elementos de la nave cobran un papel como cuerpos con masa térmica que influyen en su entorno.

Algunos de estos programas recurren al método de las funciones de transferencia para el cálculo de la transferencia de calor por conducción, lo cual se ajusta bastante a la realidad,

mientras que en este proyecto analizaremos un estado estacionario de la transferencia de calor.

Las posibilidades geométricas y estructurales son mucho más amplias ya que muchos de los programas mencionados te permiten dibujar de manera precisa el edificio en cuestión.

1.5. Características del proyecto

En concreto, se ha elegido la nave industrial por los problemas asociados al acondicionamiento térmico que sufren y porque se trata de un edificio con un diseño estructural sencillo que representa bien la envolvente general de una edificación. Por lo que las conclusiones extraídas se podrían extrapolar a muchos tipos de construcción. Un ejemplo pueden ser las naves ganaderas, porcinas o avícolas donde el diseño constructivo es similar al de una nave industrial y además también se encuentran problemas con las grandes variaciones de temperatura, las cuales pueden derivar en serios problemas de salud para los animales. Además, la nave industrial se trata de un tipo de edificación que no se encuentra sujeta a ningún tipo de legislación en el aspecto térmico (el CTE excluye a los edificios industriales de la aplicación del DB-HE Ahorro energía [2]).

La evaluación del desarrollo térmico será para naves que carezcan de equipos de climatización del aire, que se trata del caso más común para este tipo de edificios. Por lo que la solución de mayor relevancia será el desarrollo de la temperatura interna de la nave. Por otro lado, también se podrá estimar la potencia y consumo de las máquinas en caso de que el interior estuviera climatizado para así poder hacer una herramienta abierta a otras consideraciones.

Por último, se ha buscado en todo momento que las características que definan al edificio no sean muchas y además modificables para facilitar y personalizar el uso del usuario. Que sea una herramienta personalizable es una característica de gran importancia para este proyecto puesto que así se permite probar la influencia de multitud de aislamientos térmicos de todo tipo (conductivos, convectivos y de radiación).

1.5. Materiales

Los materiales para la realización de este trabajo se pueden resumir en tres programas:



Microsoft Word: Programa informático orientado al procesamiento de textos utilizado para la redacción de la memoria.



Microsoft Excel: Programa informático orientado al procesamiento de hojas de cálculo utilizado para la realización de tablas y gráficos, la comparación de datos y la extracción de conclusiones.



EES (Engineering Equation Solver): Software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Se ha utilizado para el desarrollo del modelo de cálculo en un entorno informático con el fin de estudiar, verificar y comprobar la validez de dicho modelo, además de crear un programa ejecutable que

sirva de herramienta para el análisis térmico de una nave industrial. Se ha elegido este entorno de programación por diversas razones:

- Entorno y lenguaje de programación sencillo e intuitivo.
- Capacidad de encontrar soluciones a sistemas de ecuaciones lineales y no lineales sin necesidad de simplificaciones.
- Proporciona una amplia diversidad de funciones matemáticas y lógicas, al igual que de propiedades termofísicas de los fluidos más habituales.

1.6. Método e hipótesis iniciales

Para entender mejor el modelo matemático desarrollado es necesario definir primero la base científica en la que está basado, la transferencia de calor.

La transmisión de calor hace referencia al tránsito de energía calorífica que se produce entre sistemas cuando estos tienen temperaturas diferentes. Cuanto mayor sea esta diferencia mayor será la energía involucrada en dicho intercambio, el cual tenderá a igualar la temperatura de ambos sistemas con el transcurso del tiempo. Por lo tanto, tenemos que la energía transmitida será función del tiempo y de la diferencia de temperatura. Estas dos variables añaden gran complejidad a la evaluación y al cálculo de la energía transferida debido a que obtendrá un valor diferente en cada instante. Al depender directamente del tiempo se le denomina a este estado de transmisión del calor como régimen transitorio o variable. De manera general, se buscan evaluaciones de menor complejidad, por ello mismo muchos de los problemas se diseñan en régimen permanente o estacionario. Esta simplificación mantiene las condiciones de trabajo estabilizadas desvinculando así el calor trasferido del tiempo. Las temperaturas de los sistemas permanecen constantes permitiendo obtener los perfiles de temperatura y la cantidad de calor trasferida durante el periodo de tiempo que se conserven esas condiciones. Respecto a la precisión de los resultados, el régimen transitorio se adapta más a lo que sucede realmente mientras que el régimen permanente nos un resultado atado a unas determinadas condiciones.

El análisis en régimen transitorio sería ideal para el cálculo del desarrollo térmico de forma exacta, pero ni la complejidad añadida ni el incremento de precisión se ven justificados en este trabajo.

Debido a que los datos meteorológicos [3] con los que vamos a contar en este proyecto se tratan de medias horarias, evaluaremos la transferencia de calor horaria en régimen permanente. Entonces, obtendremos distintos análisis estacionarios para cada hora del día. También se permitirá el incremento de energía interna horaria, por consistente el análisis diario global se podrá considerar como un análisis discreto en régimen transitorio.

Uno de los resultados a perseguir es el desarrollo de la temperatura interna de la nave, el cual no existe en la realidad. En un habitáculo pequeño el aire se encuentra a distintas temperaturas a la vez, solo que estas diferencias son tan pequeñas que se puede establecer una temperatura media. Cuando hablamos de recintos de mayores dimensiones, obtenemos que las diferencias de temperatura en el aire aumentan, sobretodo varían de

manera más significativa con la altura debido a la diferencia de densidades del mismo aire. Por lo tanto, un modelo de cálculo que cumple con un análisis muy preciso del gradiente de temperaturas en el interior es el cálculo por elementos finitos. Sin embargo, la complejidad de definir la estratificación del aire y su comportamiento como fluido dinámico de forma generalizada, junto a las limitaciones del entorno de programación EES descartaron dicha posibilidad. Por lo tanto, se optó por un modelo de análisis general con resultados de temperaturas y parámetros medios. Los resultados no serán exactos, pero si lo suficientemente precisos como para saber cuál es el comportamiento térmico general del edificio.

1.7. Estructura del proyecto

En primer lugar, se hablará del concepto de nave industrial y se analizará más a fondo que elementos constructivos influyen en el desarrollo térmico del edificio. Posteriormente, se expondrán las variables de entrada al modelo de cálculo (Dimensiones, materiales, datos meteorológicos y cargas internas). Seguido de las variables de entrada vendrá el desarrollo del modelo matemático, donde se especifican todas las bases teóricas aplicadas y todas las hipótesis asumidas. Para cerrar el cuerpo del trabajo, se hablará de las variables de salida y del programa ejecutable realizado. Finalmente se expondrán las conclusiones obtenidas de la realización de este proyecto.

2. CONCEPTO DE CONSTRUCCIÓN INDUSTRIAL

2.1. Introducción a la nave industrial

La nave industrial es una edificación diseñada y construida con la finalidad de producir, acondicionar, reparar o almacenar un bien o producto. Por lo que son edificios que albergaran todo tipo actividades industriales, las cuales conllevan la implicación de recursos materiales, personas, transportes internos, maquinaria, mobiliario, etc.

Se tratan de edificaciones de grandes dimensiones donde el diseño busca una solución rápida y económica adaptada a los procesos que se lleven a cabo en el interior de la nave. Normalmente se recurren a estructuras metálicas con cerramientos prefabricados. Poseen espacios interiores grandes, continuos y versátiles para así poder realizar cualquier actividad industrial. También es común ver esta misma tipología de estructura para otros fines, como pueden ser ganaderos, avícolas, agrícolas, pabellones e incluso de ocio y tiempo libre.

Las naves industriales se ubican generalmente en las afueras de las poblaciones habitadas, agrupadas en lugares que se conocen como polígonos industriales. En estas zonas cuentan con servicios comunes preparados para todo tipo de demandas de recursos, como el abastecimiento de agua, energía eléctrica o comunicación con carreteras u otros medios de transporte. En un mismo polígono industrial se pueden llevar a cabo una gran variedad de actividades industriales. Aunque, es preferible que las actividades realizadas en un polígono tengan coherencia entre sí, es decir, que los recursos, productos y residuos de una nave estén disponibles o sean demandados en otra nave del mismo polígono industrial, creando así un ecosistema industrial. Este es un concepto de gran importancia a la hora de ubicar la nave industrial debido a que siempre se busca cercanía respecto a los recursos y a los clientes para así ahorrar en tiempo, dinero y contaminación. Otro factor a tener en cuenta a la hora de ubicar la nave industrial es que el clima y las circunstancias del lugar permitan llevar a cabo la actividad industrial deseada a un coste razonable.

A día de hoy, es difícil encontrar algún elemento de nuestro entorno que no haya transitado previamente por una nave industrial, ya sea durante su proceso de fabricación o logístico. Por eso mismo, se trata de un tipo de edificación fundamental para la sociedad de hoy en día.

2.2. Tipos de estructuras industriales

Para la construcción de naves industriales se suele recurrir a estructuras simples con grandes luces. Una solución económica, funcional y muy frecuente es el uso de pórticos, los cuales permiten una gran variedad de formas y dimensiones para adecuarse a la finalidad de la nave. Además, en algunos casos se requieren estructuras que soporten grandes cargas, como pueden ser las grúas industriales. Los pórticos pueden estar fabricados de distintos materiales como hormigón y acero estructural, siendo este último material el más utilizado para la construcción de este tipo de estructuras.

Se pueden encontrar pórticos con apoyos articulados (no transmiten momento flector a los apoyos), pero es más frecuentes que los apoyos estén empotrados ya que aportan un equilibrio mejor frente a los esfuerzos de flexión causados por cargas horizontales, como puede ser la incidencia del viento sobre las grandes superficies de los cerramientos. Algunos de los pórticos que podemos encontrar para la construcción de naves industriales son:

- Pórtico de cubierta plana: Con ángulos de inclinación $< 10^\circ$, suficientes para la evacuación del agua. Buena relación entre resistencia, facilidad de montaje y separación de los pilares.

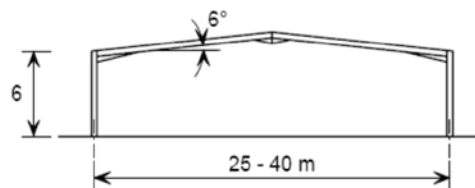


Figura 2.1: Pórtico de cubierta plana [4].

- Pórticos de cubierta curva: Diseño más original, pero de construcción algo más compleja.

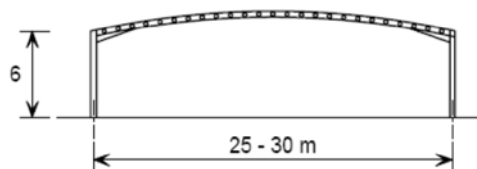


Figura 2.2: Pórtico de cubierta curva [4].

- Pórticos Mansard: Diseño orientado a salvar grandes luces, pero no son recomendables si están sometidos a grandes cargas.

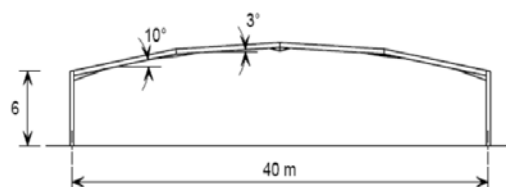


Figura 2.3: Pórtico Mansard [4].

- Pórticos de viga aligerada: Ahorran en material con las propiedades de un perfil regular.

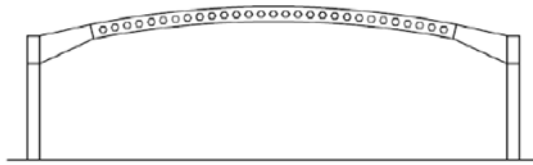


Figura 2.4: Pórtico de viga aligerada [4].

- Pórticos de inercia variable: El material de los pilares y vigas se distribuye de manera acorde a los esfuerzos en se producen en ellos, ahorrando en peso y material.

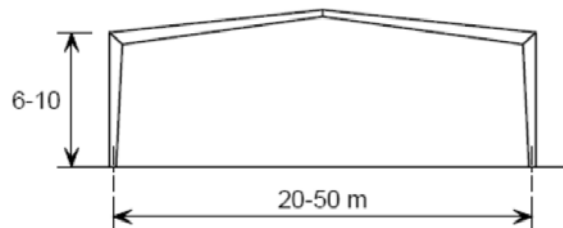


Figura 2.5: Pórtico de inercia variable [4].

- Pórticos de cercha: Las barras intermedias distribuyen los esfuerzos dando a la estructura una alta resistencia ante cualquier tipo de carga. La disposición de las barras depende del tipo de cercha elegida.

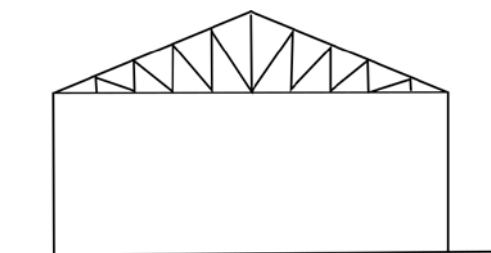


Figura 2.6: Pórtico de cercha.

Es posible disponer varios pórticos de forma paralela para conseguir las dimensiones deseadas.

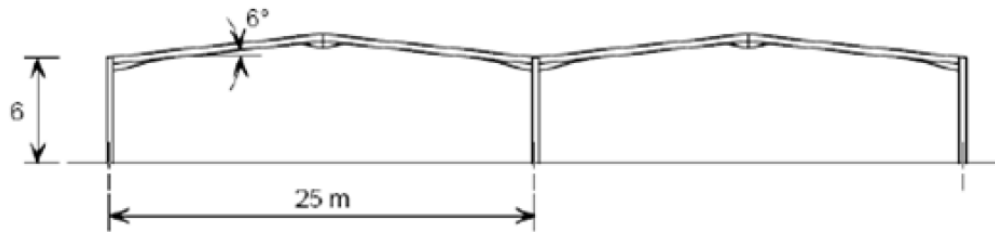


Figura 2.7: Unión de dos pórticos por uno de sus pilares [4].

Una vez elegido el tipo de pórtico, se colocan de manera longitudinal dando una sección constante a la nave. Los pórticos se unen entre sí mediante vigas, viguetas y correas. También se usan subestructuras secundarias para soportar y transmitir la carga de los cerramientos a la estructura principal.

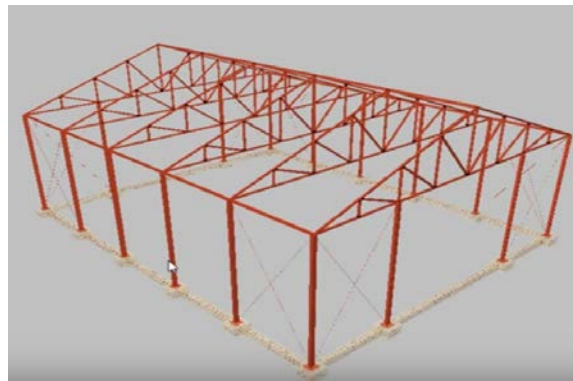


Figura 2.8: Estructura principal [5].

2.3. Cerramientos

Los cerramientos son las partes de una construcción que delimitan y acondicionan el interior de un edificio. Se tratan de superficies que envuelven a la estructura y protegen al interior de las condiciones ambientales exteriores. Los cerramientos en las naves industriales se pueden clasificar como cubierta, fachada y solera. En este trabajo nos centraremos en el estudio de los dos primeros, puesto que son los que más repercuten en las condiciones térmicas interiores. La cubierta y la fachada representan las resistencias térmicas de la envolvente de la nave, estas aumentan cuanto mayor sea el aislamiento térmico de dichos cerramientos. Por lo general, en naves industriales es común encontrar un aislamiento térmico bastante pobre, esto se debe a que las grandes superficies de los cerramientos incrementan mucho el coste del mismo. Por otro lado, podemos encontrar naves con un alto aislamiento térmico debido a que procesos, bienes o productos de las

actividades industriales llevadas a cabo requieren de condiciones térmicas muy específicas. Uno ejemplo podría ser las naves dedicadas al almacén de productos cárnicos, donde el producto puede perecer fácilmente si no se controlan las condiciones del ambiente adecuadamente.

Cubierta

La cubierta es el cerramiento con mayor exposición a los agentes externos. Debe estar protegida contra todo tipo de condiciones ambientales, tales como la radiación solar, lluvia, viento, nieve, etc. Por lo que, las propiedades más importantes de la cubierta son: estanqueidad, aislamiento, impermeabilidad, resistencia, anticorrosión y duración. Térmicamente, es el cerramiento en el que más se invierte en aislamiento para evitar tanto altas temperaturas en verano como que se convierta en un sumidero de calor en invierno. Algunos de los tipos de cerramientos más comunes son:

- Cerramientos metálicos: normalmente se trata de una chapa laminada en frío de acero, aunque también las podemos encontrar de aluminio. El acabado superficial de la chapa puede ser en galvanizado, aluzinc y prelacado en diversidad de colores. El proceso de galvanizado es quizás el más recomendable debido a sus propiedades anticorrosivas y de duración.

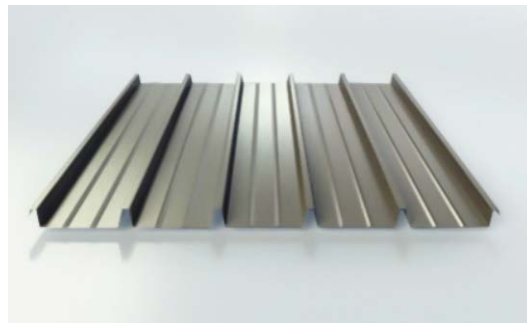


Figura 2.9: Chapa metálica grecada [6].

Se pueden encontrar diferentes perfiles de chapa, aunque el más común es el perfil de chapa grecada, el cual irá aportando mayor resistencia cuanto menor sea la distancia entre las grecas. Otro perfil muy resistente y bastante utilizado es el perfil de chapa minionda. El espesor de estas láminas metálicas suele estar entre 0,5 mm y 1,4 mm.



Figura 2.10: Perfil de chapa grecada y minionda con diferentes colores de prelacado [7].

Se trata de un tipo de cerramiento muy ligero y de bajo coste, orientado para estructuras donde no se necesite aislamiento. También es muy frecuente encontrar este tipo de chapas envolviendo algún tipo de aislamiento térmico, como sucede con los paneles sándwich, aunque en estos casos el espesor se los mismo suele ser el mínimo, 0,5mm.

- Panel Sandwich: formado por dos láminas metálicas grecadas (sus espesores pueden oscilar entre 0,4 y 0,8 mm, siendo 0,5 mm el espesor estándar) que envuelven a un núcleo de espuma rígida de poliuretano (PUR). Las láminas suelen ser de acero, aunque también las podemos encontrar de aluminio y de acero inoxidable. Lo mismo sucede con el núcleo de aislamiento, que en algunos casos lo podemos encontrar de lana de roca o de espuma rígida de poliisocianurato (PIR), según las propiedades que se demanden.

Los paneles sándwich se pueden clasificar según cuando se monten en prefabricados o in-situ. Los primeros son elementos constructivos muy sencillos de colocar en construcción al traer su montaje de fábrica, lo cual ahorra bastante tiempo de obra. Por otro lado, el montaje de los paneles sándwich in-situ es en la misma obra, lo cual aumenta el tiempo de construcción total. Además, el aislamiento de los paneles in-situ se limita a mantas de lana de roca, las cuales muestran peores propiedades térmicas que los poliuretanos, aunque posee de mejores propiedades ignífugas y acústicas.

El espesor del aislamiento suele rondar entre 4 y 6 cm para cerramientos normales de cubierta. Aunque también, es posible encontrarlo como cerramiento para cámaras frigoríficas o de congelación, donde los espesores pueden incrementarse hasta los 20cm. El acabado superficial, tanto interior como exterior, de las chapas suele ser galvanizado con algún tipo de prelacado. La variedad de colores del prelacado dependerá en todo caso de la oferta del distribuidor.

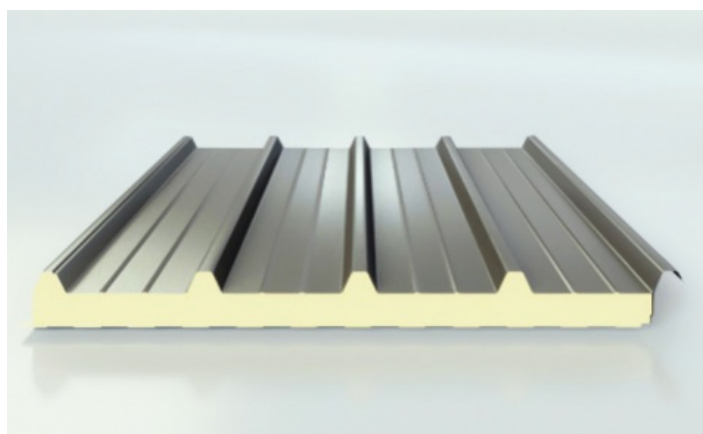


Figura 2.11: Panel Sandwich PUR con perfil grecado [8].

Los paneles sándwich, por lo general, ofrecen uno de los mejores aislamientos que se pueden encontrar en el mercado, además de una alta resistencia mecánica

con un peso de cubierta mínimo. Por lo que es una solución muy recurrida con muchas ventajas.

- Cubierta deck: el concepto es muy similar a un panel sándwich in-situ pero con la diferencia de que en vez de envolver el aislamiento entre dos chapas metálicas, este se encuentra entre una chapa inferior y una lámina impermeabilizante superior. Estas láminas suelen ser asfálticas, sintéticas de PVC, de caucho de EPDM o sintéticas de polipropileno. Para aportar mayor resistencia mecánica a la cubierta el espesor de la chapa se incrementa a un mínimo de 7 mm.

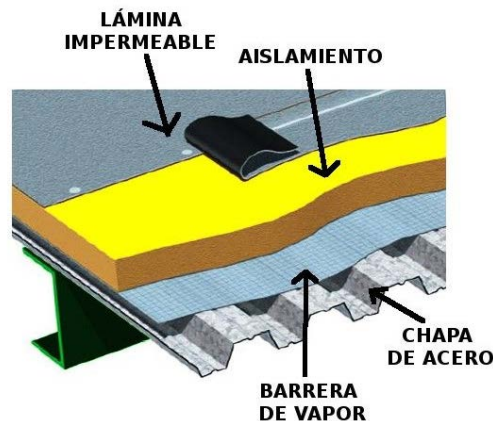


Figura 2.12: Cubierta deck [9].

Las cubierta deck es con el panel sándwich, de los cerramientos más demandados y más usuales. Su versatilidad, ligereza y combinación de propiedades protectoras hace que sea una solución muy recomendable para las cubiertas de las naves industriales.

- Planchas de fibrocemento o uralita: es un tipo de cubierta de bajo coste que está cayendo en desuso debido a la existencia de nuevos materiales más competentes. También su popularidad en España decreció significativamente cuando se prohibió el uso de amianto por ser dañino para la salud, que se trataba de uno de sus elementos principales.

El acabado superficial de la cubierta es fundamental para proteger a la cubierta de los agentes externos y evitar así su deterioro. Previamente ya se han mencionado algunos como el prelacado, galvanizado y aluzinc para chapa metálica, o el uso de láminas impermeables como las láminas asfálticas, sintéticas de PVC, de caucho de EPDM o sintéticas de polipropileno para las cubiertas deck. Estos sean quizás los más frecuentes hoy en día, aunque no son los únicos. Por ejemplo, el uso de cubiertas ajardinadas o con paneles solares está incrementado cada año ya que cumplen muy bien con las propiedades protectoras de una cubierta además de ser beneficiosas para su entorno. Otra solución más novedosa, son los revestimientos anti-radiación o de alta reflexión. Uno ejemplo es el revestimiento impermeable COOL-R del Grupo SELENA, cuyas propiedades de alta

emisividad y reflexión solar lo convierten en un excelente aislante térmico para las épocas de verano. Otro factor beneficioso es la alta durabilidad, al reflejar una alta fracción de la radiación solar provoca que el revestimiento sufra mucho menos de desgaste al contrario de otros revestimientos.

Cerramientos laterales

En los cerramientos laterales se valora sobre todo el tiempo de montaje, el coste y, por supuesto, la función estructural. Son cerramientos con mucha superficie que deben soportar grandes cargas como su propio peso y la incidencia del viento. Según las exigencias del diseño podemos encontrar los siguientes tipos de cerramientos para las fachadas de las naves industriales:

- Cerramientos metálicos: mismo concepto que para las cubiertas. En este caso su baja resistencia ante cargas hace que sea una solución de fachada para naves de poca altura.
- Panel Sandwich: mismo concepto que para las cubiertas. Las grandes superficies de las fachadas, junto a que este tipo de cerramientos no requiere tanto aislamiento térmico como la cubierta, lo convierten en un aislamiento poco usado. Normalmente su uso se reserva a naves frigoríficas o que necesiten condiciones térmicas específicas en el interior.
- Paneles y bloques de hormigón prefabricados: son elementos constructivos de hormigón pretensado, de canto constante y aligerado mediante alveolos longitudinales. Estos alveolos además de aligerar el material, producen un aislamiento conductivo en el cerramiento, que junto a su alta inercia térmica desarrollan buenas propiedades aislantes, aunque en muchos casos no es suficiente. Por ello, también podemos encontrar placas de hormigón con núcleos de espuma rígida de poliuretano o paneles de aislamiento XPS adheridos a la superficie de este tipo de cerramientos.
Se pueden distinguir dos tipos de hormigón prefabricado para fachadas, en placas y en bloques.

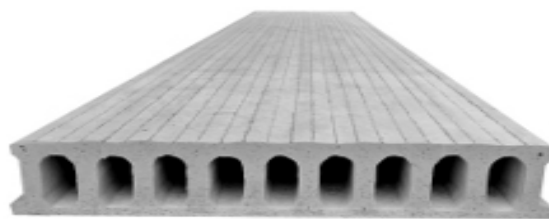


Figura 2.13: Panel alveolar de hormigón prefabricado [10].



Figura 2.14: Construcción de una fachada de paneles de hormigón prefabricado [11].



Figura 2.15: Bloque de hormigón prefabricado [12].

Los cerramientos de hormigón prefabricado son capaces de soportar grandes cargas, se trata de una solución excelente para estructuras de grandes luces y cargas con cantos pequeños.

- Ladrillos: Es un material que cada vez se utiliza menos en la construcción de naves industriales. Su coste, dimensiones, propiedades y tiempo de colocación hacen que sea una solución de fachada poco competente en el mercado actual.

2.4. Cargas térmicas

Las cargas térmicas de un edificio hacen referencia a cualquier flujo de energía que influya en las condiciones de bienestar del lugar de estudio. Por lo tanto, es de suma importancia un buen conocimiento de dichas cargas para conseguir un diseño adecuado del edificio. Sin embargo, por lo general, son imposibles de medir de forma exacta, por ello es preciso hacer un cálculo que estime dichas cargas de forma precisa. Esta estimación será el principal objetivo del programa desarrollado en este trabajo. Una vez conocidas las cargas térmicas podremos calcular las condiciones internas del espacio en cuestión. Las cargas térmicas de un edificio están provocadas de forma simultánea por varios agentes, los cuales se pueden agrupar en dos tipos:

- Cargas exteriores. En este grupo se encuentran las cargas térmicas relacionadas con los agentes y fenómenos meteorológicos al igual que con el clima. Algunos ejemplos de estos agentes son: la radiación solar, temperatura exterior, ventilación, infiltraciones de aire exterior, etc. Se relacionan con el interior del edificio a través de los cerramientos, de ahí la importancia del aislamiento térmico de los mismos. Mediante un balance térmico se determinará la cantidad de calor saliente o entrante a la nave desde el exterior de la misma.
- Cargas interiores. En este grupo incluiremos todas las fuentes de energía que procedan del interior del edificio. Algunos de las cargas internas más comunes son la ocupación (personas o animales), la iluminación, equipos eléctricos, motores eléctricos, hornos y depósitos de agua caliente. Estas cargas pueden representar tanto cargas sensibles como cargas latentes.

En muchos casos se desea realizar un control y un seguimiento de las condiciones interiores, para ello es necesario climatizar dicho espacio mediante equipos de ventilación, calefacción y refrigeración. La potencia de los equipos de acondicionamiento se verá determinada por el tipo de cargas térmicas con las que tratemos, por lo que de nuevo será imprescindible una estimación precisa de ellas para poder dimensionar los equipos. Se podrán diferenciar dos tipos de cargas según sus consecuencias de acondicionamiento que dependerán principalmente de la época del año:

- Cargas positivas o de refrigeración. Las cargas térmicas hacen que incremente el calor del lugar, situación asociada a las épocas más calurosas del año, principalmente el verano. Para realizar un acondicionamiento adecuado serán necesarias máquinas de refrigeración con una potencia que contrarresten las cargas térmicas netas del espacio en función de la temperatura objetivo. Algunas de las cargas más influyentes en este caso son la transmisión de calor por los cerramientos opacos y acristalados, la existencia de equipos eléctricos o la ocupación (personas y animales).
- Cargas negativas o de calefacción. En este segundo caso las cargas térmicas desarrollan el efecto contrario, es decir, reducen el calor del lugar. Esto sucede en las épocas más frías del año como es el invierno. Para el acondicionamiento de un espacio en dicha situación serán necesarias máquinas de calefacción que contrarresten esta reducción de calor manteniendo las condiciones internas

deseadas. Las cargas más significantes en este caso son debidas a la renovación del aire y a la transmisión de calor a través de la envolvente.

En este trabajo se incluirá el cálculo de la potencia mínima de climatización para verano e invierno al igual que el consumo diario mínimo de un “día proyecto”. Por lo que las mismas cargas externas e internas según su régimen actuarán como cargas de refrigeración o de calefacción.

3. VARIABLES DE ENTRADA

En este capítulo se analizarán todas las variables de entrada al modelo de simulación. Se comenzará explicitando las variables que definen la nave en cuestión. Posteriormente se analizarán las variables que se introducen para definir las cargas térmicas, tanto externas como internas.

3.1. Dimensiones y orientación de la nave

Como ya mencionamos anteriormente, el edificio objeto de este trabajo es la nave industrial. Para poder llevar a cabo un estudio térmico general de este tipo de construcciones es necesario elegir una estructura estándar y simplificada de las posibles edificaciones que podemos encontrar en España. Las geometrías de los pórticos más comunes (mostradas en el punto 2.2 *Tipos de estructuras industriales*) son muy similares, fachadas verticales con diferentes geometrías de cubierta. Para estructuras con la misma luz, todas las construcciones reciben la misma radiación directa, sin embargo, discrepan en la transferencia de calor total debido a que el área de la cubierta aumenta con la inclinación o curvatura de la viga usada en el pórtico. Por lo que la radiación incidente del cielo y la emitida por la cubierta dependen de la geometría y del área de la cubierta. Lo mismo sucede con la transferencia de calor por convección, ya que la velocidad del viento incidente difiere según la dimensión, geometría y rugosidad de la superficie. La diferencia entre el flujo de calor transferido a través de las diversas estructuras no es significativa si lo comparamos a la diferencia que pueden provocar otros factores más relevantes, como la diferencia que puede producir una mínima capa de aislamiento térmico en los cerramientos. Por esto mismo se ha optado por la solución más simple y representativa, el pórtico de cubierta plana, quien representa de forma simplificada y orientativa el funcionamiento térmico del resto de configuraciones. La geometría de una nave industrial basada en esta estructura puede reducirse a un prisma rectangular, es decir, paredes ortogonales al suelo y a la cubierta, considerándose esta última plana en la horizontal.

Las dimensiones que definirán la estructura de la nave son: alto, ancho y largo de la nave. Las áreas con subíndices P1 y P2 hacen referencia a las dos áreas posibles de las paredes de la nave, siendo P1 la pared de área menor.

$$A_C = A_S = \text{ancho} \cdot \text{largo}$$

$$A_{P1} = \text{alto} \cdot \text{ancho}$$

$$A_{P2} = \text{alto} \cdot \text{largo}$$

$$V = \text{alto} \cdot \text{ancho} \cdot \text{largo}$$

La orientación de la nave influye en el cálculo térmico a causa de la posición relativa del sol. El sol irradiará la mayor parte de su energía sobre la cara sur. Por tanto, el sol no influirá de igual manera si la cara sur está constituida por la pared de mayor área que por la de menor. La orientación se incluirá mediante el ángulo θ ($^{\circ}$) que indicará la desviación

de una de las paredes de menor área (tipo P1) respecto a la dirección sur. Por lo tanto, tenemos que las paredes tipo P2 son las orientadas al este y oeste mientras que las paredes tipo P1 son las orientadas al norte y al sur¹.

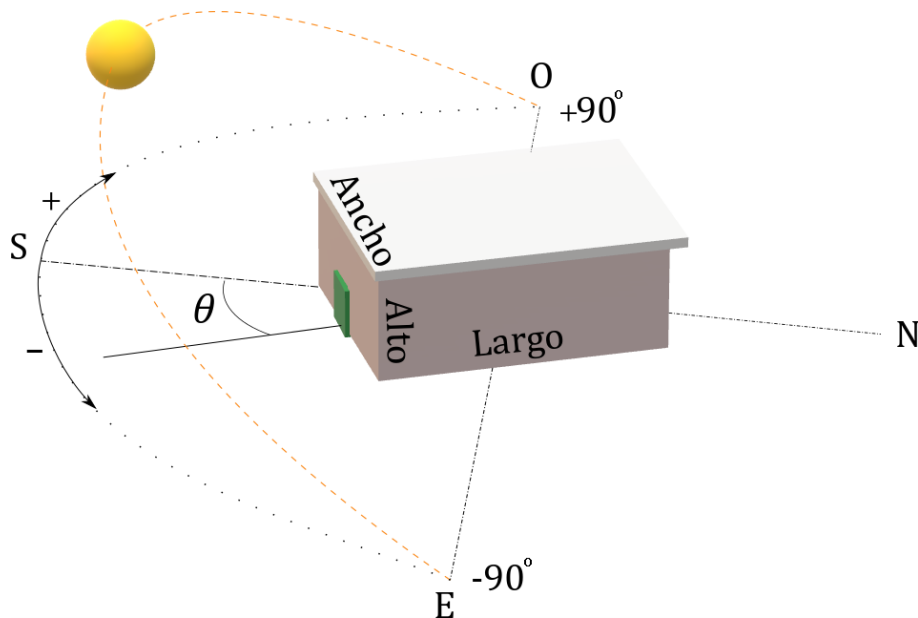


Figura 3.1: Dimensionado y orientación de la nave.

Variables de entrada necesarias: Largo, Ancho, Alto y θ (Ejemplo: 80 x 12,5 x 6 m +20°)

3.2. Materiales de la cubierta y de las paredes

Como ya vimos en el punto 2.3. *Cerramientos*, existen multitud de materiales y posibilidades para el diseño de los cerramientos. En este trabajo, tan solo analizaremos los cerramientos más comunes que se pueden encontrar para una nave industrial. En la *tabla 3.1* se muestran los elementos constructivos elegidos para los cerramientos de la cubierta y fachada con sus respectivas propiedades térmicas. Estas propiedades corresponden a valores medios y frecuentes que se han estipulado para este trabajo y han sido extraídas de Neila [1], CTE [13], [14] y contrastadas con diversas fichas técnicas. Puesto que cada material expuesto tiene multitud de variantes con diferentes propiedades, los datos expuestos en la *tabla 3.1* no son representativas de todas las variantes del material, pero si son coherentes a su tipología.

¹ En caso de que las paredes tipo P2 se encuentren orientadas al norte y al sur el ángulo correspondiente será $\theta = 90^\circ$.

TABLA 3.1: PROPIEDADES DE LOS MATERIALES SELECCIONADOS PARA LOS CERRAMIENTOS

Nombre	Densidad - ρ [kg/m ³]	Capacidad térmica específica - c [J/ kg K]	Conductividad térmica - k [W/m K]	Espesores estándar
Chapa de acero	7800	450	50	5, 8, 10, 12, 14 mm
Chapa de aluminio	2700	880	230	5, 8, 10, 12, 14 mm
Panel Sandwich - PUR	45	1000	0,031	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 y 20 cm
Panel Sandwich - PIR	40	1000	0,021	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 y 20 cm
Panel Sandwich - Lana de roca	40	1000	0,038	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 y 20 cm
Bloques de hormigón prefabricado	1200	1000	0,3	15, 20, 25, 30 y 40 cm.

Se considerará que todas las paredes estarán diseñadas y construidas de manera idéntica (mismos materiales, mismos espesores y mismos acabados). Por lo que estos materiales podrán constituir las paredes (ρ_P , c_P , k_P y e_P) o la cubierta (ρ_C , c_C , k_C y e_C). El espesor será determinado por el usuario en unidades de metros. Para el caso de que el usuario desee estudiar otros tipos de cerramiento se dejará la libre opción de introducir las propiedades que lo determinen ($\rho_{i\ otro}$, $c_{i\ otro}$, $R_{i\ otro}$ y $e_{i\ otro}$). De nuevo, las unidades tienen que corresponder con las del sistema internacional de medida en todos los casos.

Las propiedades del suelo han sido extraídas de *Condiciones de aceptación de Procedimientos alternativos a LIDER y CALENER* [15].

$$\rho_s = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$c_s = 1000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

El acabado superficial influye significativamente en la transferencia de calor por radiación. Por eso mismo, se han establecido distintas terminaciones para los cerramientos de la fachada y de la cubierta, tanto de las superficies interiores como de las exteriores. Las propiedades que definirán estas superficies son la emisividad ε y la reflectancia solar ρ_{solar} . De manera análoga a la *tabla 3.1*, se han establecido para la *tabla 3.2* unos valores medios y frecuentes para las propiedades de los acabados superficiales, que han sido extraídos de Neila [1], Incropera [16], Mills [17], [18], [19], [20], [21] y [22].

TABLA 3.2: PROPIEDADES DE LOS ACABADOS SUPERFICIALES SELECCIONADOS PARA LOS CERRAMIENTOS.

Nombre	Emisividad - ε (%)	Reflectancia solar- ρ_{solar} (%)
Pintura rojo claro	90	55
Pintura rojo oscuro	90	25
Pintura verde claro	90	55
Pintura verde oscuro	90	25
Pintura azul claro	85	55
Pintura azul oscuro	85	20
Pintura gris claro	85	60
Pintura gris oscuro	90	15
Pintura negra	95	8
Pintura blanca	90	78
Chapa galvanizada	28	60
Aluminio pulido	5	85
Acero pulido	70	65
Lamina asfáltica	95	10
Hormigón claro	93	40
Hormigón oscuro	93	20
Cool-R	85	85,7

También existirá la posibilidad de añadir otro material con sus propiedades que tendrá que establecer el usuario mediante los parámetros mencionados previamente (ε_i otros y $\rho_{i solar}$ otros).

La emisividad y la reflectancia solar del terreno circundante al edificio ha sido extraído de [15].

$$\varepsilon_T = 0,8$$

$$\rho_{T solar} = 0,2$$

Para el cálculo de la reflectancia normal se asume que todas las superficies son grises por lo que se puede calcular mediante la *ecuación 3.1*.

$$\rho_i = 1 - \varepsilon_i \quad (3.1)$$

- Variables de entrada necesarias: Espesor y tipo de material, acabado superficial interior y exterior de la cubierta (Ejemplo: 0,05m, panel sándwich PUR, chapa galvanizada, pintura blanca); espesor y tipo de material, acabado superficial interior y exterior de las paredes (Ejemplo: 0,15m, bloque de hormigón, hormigón, hormigón); acabado superficial del suelo (Ejemplo: pintura azul claro).

3.3. Localización y datos climáticos asociados

La localización del edificio objeto es un factor determinante en el diseño de un edificio debido principalmente al clima. Este adquiere un papel fundamental y constante en el desarrollo térmico del edificio. Por eso mismo es importante un diseño y una elección de los materiales que estén justificados respecto al clima del lugar. También hay que tener en cuenta que el entorno del que se rodee puede ser relevante a la hora del desarrollo energético del edificio. Unos ejemplos de este factor son las sombras que pueden proyectar otros edificios o la vegetación cercana sobre nuestro edificio, variando la radiación solar incidente, o la rugosidad del terreno, que determinará en gran parte la velocidad del viento que esté en contacto con los cerramientos del edificio. Sin embargo, en este estudio se intentarán simplificar estos factores debido a que se tratan de casos muy concretos y diversos que no se justifican en el objetivo de este trabajo.

La diversidad climática del territorio español obliga a la clasificación de distintas zonas climáticas de referencia. Donde cada localidad adquiere las propiedades climáticas de su provincia. Existe la posibilidad de que la localidad en cuestión adquiera distinta clasificación climática para los casos que la diferencia de altura entre ambas sobrepase ciertos límites. Tanto la clasificación climática de la península ibérica como la de las islas canarias será en función de la provincia y de altura respecto al nivel del mar h (tabla 3.1 y 3.2)

TABLA 3.3: ZONAS CLIMÁTICAS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA
(DB-HE CTE [2])

Zonas climáticas Península Ibérica																		
Capital	Z.C.	Altitud	A4	A3	A2	A1	B4	B3	B2	B1	C4	C3	C2	C1	D3	D2	D1	E1
Albacete	D3	677										h < 450			h < 950			h ≥ 950
Alicante/Alacant	B4	7					h < 250					h < 700			h ≥ 700			
Almería	A4	0	h < 100				h < 250	h < 400				h < 800			h ≥ 800			
Ávila	E1	1054									h < 400	h < 450			h ≥ 450	h < 550	h < 850	h ≥ 850
Badajoz	C4	168																
Barcelona	C2	1											h < 250			h < 450	h < 750	h ≥ 750
Bilbao/Bilbo	C1	214												h < 250			h ≥ 250	
Burgos	E1	861															h < 600	h ≥ 600
Cáceres	C4	385									h < 600				h < 1050			h ≥ 1050
Cádiz	A3	0		h < 150				h < 450				h < 600	h < 850			h ≥ 850		
Castellón/Castelló	B3	18					h < 50					h < 500			h < 600	h < 1000		h ≥ 1000
Ceuta	B3	0					h < 50											
Ciudad Real	D3	630									h < 450	h < 500			h ≥ 500			
Córdoba	B4	113					h < 150				h < 550				h ≥ 550			
Coruña, La/ A Coruña	C1	0												h < 200			h ≥ 200	
Cuenca	D2	975													h < 800	h < 1050		h ≥ 1050
Gerona/Girona	D2	143											h < 100			h < 600		h ≥ 600
Granada	C3	754	h < 50				h < 350				h < 600	h < 800			h < 1300			h ≥ 1300
Guadalajara	D3	708													h < 950	h < 1000		h ≥ 1000
Huelva	A4	50	h < 50				h < 150	h < 350				h < 800			h ≥ 800			
Huesca	D2	432										h < 200			h < 400	h < 700		h ≥ 700
Jaén	C4	436					h < 350				h < 750				h < 1250			h ≥ 1250
León	E1	346																h < 1250
Lérida/Lleida	D3	131										h < 100			h < 600			h ≥ 600
Logroño	D2	379											h < 200			h < 700		h ≥ 700
Lugo	D1	412															h < 500	h ≥ 500
Madrid	D3	589										h < 500			h < 950	h < 1000		h ≥ 1000
Málaga	A3	0						h < 300				h < 700			h ≥ 700			
Melilla	A3	130																
Murcia	B3	25						h < 100				h < 550			h ≥ 550			
Ourense/Ourense	D2	327										h < 150	h < 300			h < 800		h ≥ 800
Oviedo	D1	214												h < 50			h < 550	h ≥ 550
Palencia	D1	722															h < 800	h ≥ 800
Palma de Mallorca	B3	1					h < 250					h ≥ 250						
Pamplona/Iruña	D1	456											h < 100			h < 300	h < 600	h ≥ 600
Pontevedra	C1	77												h < 350			h ≥ 350	
Salamanca	D2	770														h < 800		h ≥ 800
San Sebastián/Donostia	D1	5															h < 400	h ≥ 400
Santander	C1	1												h < 150			h < 650	h ≥ 650
Segovia	D2	1013														h < 1000		h ≥ 1000
Sevilla	B4	9					h < 200				h ≥ 200							
Soria	E1	984														h < 750	h < 800	h ≥ 800
Tarragona	B3	1						h < 50				h < 500			h ≥ 500			
Teruel	D2	995										h < 450	h < 500			h < 1000		h ≥ 1000
Toledo	C4	445									h < 500				h ≥ 500			
Valencia/València	B3	8					h < 50					h < 500				h < 950		h ≥ 950
Valladolid	D2	704														h < 800		h ≥ 800
Vitoria/Gasteiz	D1	512															h < 500	h ≥ 500
Zamora	D2	617														h < 800		h ≥ 800
Zaragoza	D3	207										h < 200			h < 650			h ≥ 650
Capital	Z.C.	Altitud	A4	A3	A2	A1	B4	B3	B2	B1	C4	C3	C2	C1	D3	D2	D1	E1

TABLA 3.4: ZONAS CLIMÁTICAS DE LAS ISLAS CANARIAS
(DB-HE CTE [2])

Zonas climáticas Canarias						
Capital	Z.C.	Altitud	$\alpha 3$	A2	B2	C2
Palmas de Gran Canaria, Las	$\alpha 3$	114	$h < 350$	$h < 750$	$h < 1000$	$h \geq 1000$
Santa Cruz de Tenerife	$\alpha 3$	0	$h < 350$	$h < 750$	$h < 1000$	$h \geq 1000$

La Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo del Ministerio de Fomento tiene publicado de forma gratuita los datos que definen el clima de referencia de cada zona climática que podemos encontrar en España, cumpliendo así con las solicitudes exteriores de cálculo para un año tipo de cada zona. Estos archivos los podemos encontrar en [3], aunque también se pueden encontrar estos archivos en *Datos Meteorológicos* [23]. Los datos se encuentran publicados en formato .MET, donde se indica de forma inicial la zona climática, latitud, longitud, altitud y longitud de referencia para el cálculo de la hora oficial. Después encontramos 8760 líneas de datos que representan las medias horarias de cada parámetro a lo largo del año en cada una de las zonas climáticas. Se encuentran clasificados en los siguientes campos (se les ha asignado un símbolo a aquellos que aparezcan en las operaciones analíticas del modelo).

- Mes (1 a 12)
- Día (1 a 31)
- Hora (1 a 24)
- T_{ext} - Temperatura seca (°C)
- T_{cielo} - Temperatura efectiva del cielo (°C)
- $G_{solar,D}$ - Irradiancia solar directa sobre una superficie horizontal (W/m²)
- $G_{solar,d}$ - Irradiancia solar difusa sobre una superficie horizontal (W/m²)
- w_{ext} - Humedad específica (kg H₂O/kg aire seco)
- Humedad relativa (%)
- v - Velocidad del viento (m/s)
- Dirección del viento (grados respecto al norte, E+, O-)
- Azimut solar (grados)
- Cénit solar (grados)

En el documento Climas de referencia [24] podemos encontrar una explicación más detallada de estos datos.

Para la realización del programa en cuestión, se ha decidido limitar el análisis a un “día proyecto”, es decir, de un día representativo de las circunstancias meteorológicas que podemos encontrar en una cierta época del año. Se ha elegido un día solo debido a la limitación del software EES a 6000 ecuaciones y que puede ser una guía más que representativa de los resultados que obtendremos durante esa época. Se ha decidido analizar el régimen de verano y de invierno, ya que son las épocas que determinarán el acondicionamiento de la nave. Por lo que será necesario especificar el régimen de diseño (verano o invierno).

Con lo que respecta a las propiedades del aire, en la referencia *Liquid Materials Handbook* [25] establecen las siguientes propiedades para una temperatura de $T = 300\text{ K}$ y una presión de $P = 1\text{ atm}$, que se considerarán como las condiciones normales de estudio para este trabajo.

$$\begin{aligned}\rho_{\text{aire}} &= 1,1614\text{ kg/m}^3 \\ c_{p_{\text{aire}}} &= 1007\text{ J/kg} \cdot \text{K} \\ h_{fg\text{ air}} &= 2338\text{ kJ/kg} \\ v_{\text{aire}} &= 15,89 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s} \\ k_{\text{aire}} &= 26,3 \times 10^{-3}\text{ W/m} \cdot \text{K} \\ Pr_{\text{aire}} &= 0,707\end{aligned}$$

El software EES tiene una gran base de datos con propiedades de diferentes materiales, entre ellos el aire húmedo. Por lo que en la realización del código se han determinado estas propiedades a partir de su base de datos y se ha verificado que corresponden a las de [25].

Carga por ventilación

Esta carga representa la ventilación forzada, la ventilación natural y las infiltraciones de aire del exterior. El parámetro representativo de esta carga será el número de renovaciones (*rev*), que indica el número de veces que el aire interior es sustituido por el exterior cada hora. Para ventilación natural más infiltraciones suele rondar entre $0,1 - 0,5\text{ rev}$. Sin embargo, cuando la nave posee equipos de ventilación la renovaciones pueden incrementar a $4 - 10\text{ rev}$. Aunque estos valores dependerán del caso con el que tratemos ya que es un parámetro muy específico.

Temperatura de consigna

Para el análisis de la carga amortiguada por el equipo de climatización (equipo de refrigeración en verano y calefacción en invierno) es necesario determinar una temperatura de consigna T_{AC} para las horas laborables (horario que establece el funcionamiento de los equipos).

🚦 Variable de entrada necesaria: Localización, régimen, *rev* y T_{AC} (Ejemplo: Madrid, verano, 4 rev y 25°C)

3.4. Cargas internas

Las cargas internas varían según muchos factores que no se pueden estimar sin un buen conocimiento de la finalidad y funcionamiento del caso de estudio. Dependen exclusivamente de cada caso, por esto mismo, se tendrá en cuenta la posibilidad de introducir algunas de las cargas internas más comunes que podemos encontrar en las naves industriales.

Cargas por ocupación

Los seres humanos realizamos de forma constante transformaciones exotérmicas mediante reacciones metabólicas en todo nuestro organismo. Gracias a ellas somos capaces de mantener una temperatura corporal constante de 36,5 °C, con un rango de tolerancia muy pequeño. La capacidad de disipar energía térmica a cada instante hace que nos convirtamos en fuentes de calor para nuestro entorno. Sin embargo, esta producción de energía metabólica en forma de calor no es para nada constante, ya que depende de muchos factores. El fundamental es el tipo de actividad o trabajo que esté realizando el individuo. Por ejemplo, en un estado de reposo absoluto la generación de energía se minimiza imponiendo un límite inferior denominado metabolismo basal. En estados de mayor actividad el calor residual se incrementa de forma casi proporcional al consumo de oxígeno realizado, debido a que este actúa como carburante en dichas reacciones. La edad y el sexo de la persona también se consideran factores determinantes, dado que las cantidades de calor disipado por una mujer y un niño son el 85% y el 75%, respectivamente, de las desarrolladas por un hombre adulto.

La transferencia de calor se origina por tres causas: por irradiación a su entorno, por convección hacia el aire que le rodea y por evaporación en epidermis y vías respiratorias. El tipo de energía disipada en este último se denomina calor latente. Al evaporar líquidos compuestos principalmente por agua se incrementa la humedad en el aire ambiente, introduciendo en el mismo 2422 J por gramo de agua que han sido necesarios para realizar dicho cambio de estado. Este mecanismo de transmisión de calor depende de la diferencia de las tensiones de vapor, mientras que por convección y radiación depende de las diferencias de temperatura entre la epidermis de la persona y sus alrededores. De forma general este calor disipado por diferencia de temperaturas aumentará el calor sensible de su entorno.

Debido a la multitud de variables que pueden determinar esta producción de calor en un individuo, se recurre a valores tabulados. Con ellos se obtiene una estimación general del calor disipado por una persona en función del tipo de actividad que esté realizando. La *tabla 3.5* ha sido elaborada para este trabajo mediante un contraste de tres fuentes de referencia: Neila [1, pp 58], Carrier [26, Parte 1, pp 94] y NPT: 323 [27].

TABLA 3.5: VELOCIDAD DEL METABOLISMO SEGÚN LA ACTIVIDAD

Actividad	Potencia metabólica	
	W/m ²	q_{pers} (W)
Sentado en reposo	64	115
Trabajo muy ligero (Oficina, marcha lenta)	83	150
Trabajo ligero (Actividad manual ligera, desplazamientos ligeros <3,5 km/h)	111	200
Trabajos moderados (Actividad con alta implicación corporal, traslado de objetos, desplazamientos a velocidad moderada [3,5, 5,5] km/h)	166	300
Trabajos intensos (actividad corporal intensa, transporte de objetos pesados, desplazamientos a velocidad elevada [5,5, 7] km/h)	222	400
Trabajos muy intensos (Actividad muy intensa a marcha rápida, subir escaleras o rampas, correr, desplazamientos rápidos >7 km/h)	277	500

Como ya mencionamos el metabolismo depende de diversos factores como el sexo y la edad. Para la elaboración de la *tabla 3.5* se ha optado por considerar la situación más desfavorable de producción de calor para sus alrededores, es decir, el metabolismo que aporte mayor cantidad de calor por segundo, que corresponde al metabolismo de un hombre adulto. En la *tabla 3.5* se observan dos formas de expresar el metabolismo, en potencia por unidad de área corporal y en potencia. Para realizar esta conversión de unidades se ha optado por elegir un sujeto medio de la población española (1,7 m y 70kg) cuya área corresponde aproximadamente a 1,8 m². Este valor se puede obtener mediante la *ecuación 3.2* extraída de Neila [1].

$$A_{corporal} = 0,202 m^{0,425} h^{0,725} \quad (3.2)$$

Como ya mencionamos con anterioridad, el calor que aporta una persona a sus alrededores se compone de calor sensible y latente. La fracción que determina la cantidad del tipo de calor disipado depende mayoritariamente de la temperatura ambiente, es decir, mientras que el calor total transmitido por un individuo (*tabla 3.5*) es constante en función del tipo de actividad, las proporciones de la carga sensible y latente que representan las personas varían con la temperatura. Altas temperaturas benefician a la generación de calor latente, mientras que las bajas temperaturas mueven el equilibrio a la disipación de energía en calor sensible.

Al tratarse de un estudio del desarrollo de la temperatura en una nave industrial, la aportación de calor latente no será relevante. Por tanto, es necesario conocer que fracción del metabolismo, para cada actividad, se convierte en calor sensible. En Carrier [26, Parte

1, pp 94] se puede encontrar de forma tabulada la distribución de calor sensible y latente para diversas temperaturas ambiente en función del tipo de actividad.

TABLA 3.6: GANANCIAS DE CALOR DEBIDA A LOS OCUPANTES (CARRIER [26, PARTE 1, TABLA 48])

GRADO DE ACTIVIDAD	TIPO DE APLICACIÓN	Metabolismo hombre adulto (kcal/h)	Metabolismo medio * (kcal/h)	TEMPERATURA SECA DEL LOCAL (°C)									
				28		27		26		24		21	
				kcal/h		kcal/h		kcal/h		kcal/h		kcal/h	
				Sensibles	Latentes	Sensibles	Latentes	Sensibles	Latentes	Sensibles	Latentes	Sensibles	Latentes
Sentados, en reposo	Teatro, escuela primaria	98	88	44	44	49	39	53	35	58	30	65	23
Sentados, trabajo muy ligero	Escuela secundaria	113	100	45	55	48	52	54	46	60	40	68	32
Empleado de oficina	Oficina, hotel, apartamento, escuela superior	120	113	45	68	50	63	54	59	61	52	71	42
De pie, marcha lenta	Almacenes, tienda	139											
Sentado, de pie	Farmacia	139											
De pie, marcha lenta	Banco	139	126	45	81	50	76	55	71	64	62	73	53
Sentado	Restaurante **	126	139	48	91	55	84	61	78	71	68	81	58
Trabajo ligero en el banco de taller	Fábrica, trabajo ligero	202	189	48	141	55	134	62	127	74	115	92	97
Baile o danza	Sala de baile	227	214	55	159	62	152	69	145	82	132	101	113
Marcha, 5 km/h	Fábrica, trabajo bastante penoso	252	252	68	184	76	176	83	169	96	156	116	136
Trabajo penoso	Pista de bowling *** Fábrica	378	365	113	252	117	248	122	243	132	233	152	213

* El «metabolismo medio» corresponde a un grupo compuesto de adultos y de niños de ambos sexos, en las proporciones normales. Estos valores se han obtenido a base de las hipótesis siguientes:
Metabolismo mujer adulta = Metabolismo hombre adulto × 0,85
Metabolismo niño = Metabolismo hombre adulto × 0,75

** Estos valores comprenden una mejora de 13 kcal/h (50 % calor sensible y 50 % calor latente) por ocupante, para tener en cuenta el calor desprendido por los platos.

*** Bowling – Admitir una persona por pista jugando, y todas las otras sentadas (100 kcal/h) o de pie (139 kcal/h).

Para este trabajo se ha decidido determinar la fracción de calor sensible mediante el ajuste de modelos matemáticos a las proporciones de la *tabla 3.6*. En primer lugar, se han obtenido estas proporciones de calor latente y sensible de manera porcentual para tres temperaturas 21°C, 25°C y 28°C.

Ejemplo de cálculo para trabajo ligero en el banco de taller:

$$f_{28^{\circ}\text{C}} = \frac{\text{calor sensible}}{\text{calor total}} = \frac{48 \text{ kcal/h}}{189 \text{ kcal/h}} = 0,2539$$

Se han elegido las temperaturas de 21°C y 28°C por ser los extremos conocidos y la de 25°C por ser una temperatura de bienestar térmico además de una temperatura muy estandarizada. Se puede observar que la temperatura de 25°C no aparece en la *tabla 3.6*, sin embargo se ha estimado su distribución como la media de los valores obtenidos para las temperaturas de 24°C y 26°C. En segundo lugar, se han graficado las fracciones de calor sensible en función del metabolismo para las tres temperaturas elegidas (*figura 3.2*). Posteriormente se ha estudiado el modelo matemático que mejor representa estas distribuciones. En la *figura 3.2* se puede observar que las distribuciones para las distintas temperaturas siguen patrones muy parecidos (justificando así la estimación de la curva para 25°C).

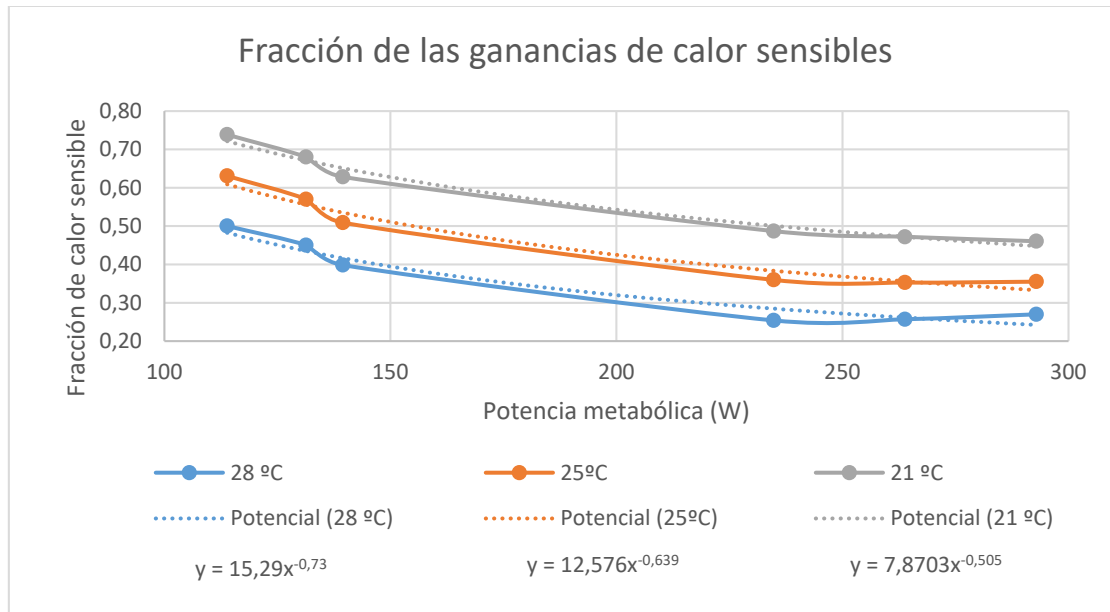


Figura 3.2: Fracción de ganancias de calor sensible en función del metabolismo, para las distribuciones reales y los modelos ajustados.

La función matemática que más se ajusta a las tres curvas es la potencial, donde si introducimos las variables correspondientes obtenemos las ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.4. La aplicación de estas funciones está condicionada a la temperatura ambiente del interior de la nave, la cual varía durante todo el día. Como carecemos de un rango alto de temperaturas y además las ganancias de calor por ocupación, por lo general, no son muy significantes para un edificio de grandes dimensiones como la nave industrial, se ha decidido aplicar los siguientes rangos de aplicación:

- Si $T_{amb} \leq 21\text{ °C}$

$$f_{21\text{°C}} = 7,8703 q_{pers}^{-0,505} \quad (3.3)$$

- Si $21\text{ °C} < T_{amb} < 28\text{ °C}$

$$f_{25\text{°C}} = 12,576 q_{pers}^{-0,639} \quad (3.4)$$

- Si $28\text{ °C} < T_{amb} \leq 36\text{ °C}$

$$f_{28\text{°C}} = 2,5385 q_{pers}^{-0,73} \quad (3.5)$$

- Si $T_{amb} > 36\text{ °C}$

$$f_{36\text{°C}} = 0 \quad (3.6)$$

La ecuación 3.5 se justifica sabiendo que temperatura corporal del ser humano es aproximadamente 36°C , por eso mismo a partir de esa temperatura es imposible que exista transferencia de calor sensible. Por lo que toda la energía transferida a temperaturas ambiente mayores a 36°C será mediante la disipación de energía latente.

Concluimos así con la ecuación 3.6, que determina el aporte de calor sensible debido a la ocupación en el interior de un edificio. Estas ganancias de calor son función de los coeficientes fraccionarios, el metabolismo y el número de personas que se encuentran en el interior del edificio.

➤ Si $Hora_{inicio} \leq Hora(t) < Hora_{fin}$

$$q_{ocup} = f(T_{amb}) \cdot q_{pers}(\text{Tipo de trabajo}) \cdot n_{pers} \quad (3.7)$$

Donde n_{pers} representa el número de personas de un local.

Estas ganancias de calor por ocupación no representan una carga constante a lo largo del día, sino que solo se consideran durante los horarios laborales. Al igual sucederá con las cargas internas que veremos más adelante, van sujetas a horarios. Para ello se añaden las variables de entrada $Hora_{inicio}$ y $Hora_{fin}$. Estas determinarán las horas entre las cuales las cargas internas se desarrollan y transmiten calor al interior de la nave (horarios laborales y de funcionamiento de los equipos de climatización). Estas variables son naturales (N) y con un dominio de [1, 24].

✚ Variables de entrada necesarias: *Tipo de trabajo*, n_{pers} , $Hora_{inicio}$ y $Hora_{fin}$ (Ejemplo: Trabajo ligero, 50 personas, 8h y 20h)

Cargas por iluminación artificial

El alumbrado o iluminación de una nave constituye una fuente de calor sensible. Se debe a que representan resistencias eléctricas que emiten toda su potencia eléctrica consumida en calor y luz. Para este trabajo se considerará que toda la potencia consumida se transformará finalmente en calor, el cual se trasmite por radiación, convección y conducción al interior de la nave. Normalmente en las naves industriales se suele utilizar el mismo tipo de lámparas para el alumbrado. Por ello mismo para calcular las ganancias por alumbrado se considerará como la potencia nominal de una lámpara (q_{ilum}) por el número de lámparas de ese tipo (n_{ilum}) que estén en funcionamiento durante el horario laboral.

➤ Si $Hora_{inicio} \leq Hora(t) < Hora_{fin}$

$$q_{ilum\ tot} = q_{ilum} \cdot n_{ilum} \quad (3.8)$$

✚ Variables de entrada necesarias: q_{ilum} y n_{ilum} (Ejemplo: 150 W y 10 lámparas)

Cargas por maquinaria o motores.

Las ganancias de calor por el uso de motores o maquinaria dependen concretamente de cada caso. Por lo tanto, será necesario consultar los datos de fábrica para valorar las ganancias de calor que representan. Por una parte, normalmente no se utilizarán todas las máquinas de forma simultánea, con lo cual habrá que aplicar un factor de empleo a la ganancia de calor en plena carga. Por otra parte, los motores constituyen una carga constante y muy importante en instalaciones industriales durante los horarios laborales. Por ello, esta vez se introducirá la variable q_{maq} , la cual representa la potencia calorífica que representan todas las maquinarias y todos los motores en un día estándar de trabajo durante el horario laboral.

🔧 Variables de entrada necesarias: q_{maq} (Ejemplo: 2500 W)

Cargas por equipos eléctricos

En este tipo de cargas incluimos ordenadores, impresoras, fotocopadoras, electrodomésticos, y básicamente cualquier utensilio que genere calor mediante el consumo de electricidad (herramientas eléctricas, cafetera, etc.). La suma de estas cargas se representará con el símbolo q_{elec} . La estimación de la generación de calor asociada a cada equipo eléctrico dependerá de la condición del mismo y de sus datos técnicos. Esa interpretación específica será considerada por el usuario.

🔧 Variables de entrada necesarias: q_{elec} (Ejemplo: 1200 W)

Otras cargas internas

En las naves industriales podemos encontrar todo tipo de cargas internas. Anteriormente solo hemos explicitado las más comunes, pero eso no significa que para cada caso no podamos encontrar otros tipos de cargas térmicas igual o incluso más significantes que las anteriores. Por eso mismo, se ha tomado la decisión de dejar la posibilidad de añadir una carga térmica sensible (q_{otros}) con sus respectivos horarios de funcionamiento ($Hora_{inicio\ otros}$ y $Hora_{fin\ otros}$). Las variables para determinar el periodo de funcionamiento son valores naturales (\mathbb{N}) y con un dominio de [1, 24].

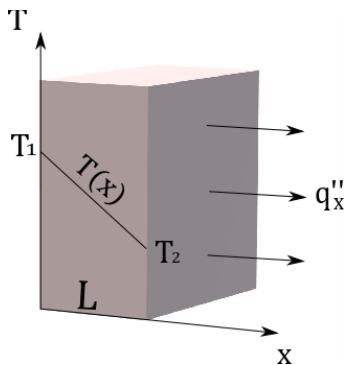
🔧 Variables de entrada necesarias: q_{otros} , $Hora_{inicio\ otros}$ y $Hora_{fin\ otros}$
(Ejemplo: 500 W, 10h y 14h)

4. TRASMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN

4.1. Fundamentos teóricos

La conducción es la transferencia de calor en un sólido o un fluido estacionario. Es consecuencia de la diferencia de actividad atómica y molecular en un medio, donde la energía fluye de los lugares de mayor a menor actividad a través de las interacciones entre las mismas partículas. Para poder cuantificar este proceso de transferencia de calor existe la *ley de Fourier*, que para una pared plana unidimensional en régimen permanente y sin generación de calor interna la ecuación o modelo se expresa como:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$



Donde q_x'' representa el flujo de calor (W/m^2) en la dirección x y k la conductividad térmica (W/mK) del material de la pared.

Para una pared unidimensional y homogénea de longitud L , en condiciones de estado estable la distribución de temperaturas $T(x)$ es lineal, tal y como se observa en *Figura 4.1*. El flujo de calor en este caso se puede definir como

Figura 4.1: Flujo de calor por conducción unidimensional en pared plana.

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (4.2)$$

La transmisión unidireccional se justifica cuando el espesor de la pared es pequeño en relación con la altura y el ancho, entonces es razonable asumir que la conducción sucede de forma exclusiva en la dirección x .

Estas mismas consideraciones se tendrán para el cálculo de la transmisión de calor en los cerramientos del edificio debido a que podemos asumir que se tratan de paredes planas y de composición homogénea en su longitud. Sin embargo, por lo general estos cerramientos están constituidos por varios materiales. Para poder llegar a las expresiones para las paredes compuestas definiremos previamente el concepto de resistencia térmica.

La resistencia térmica propone una analogía entre la transmisión de calor y la transmisión de energía eléctrica en circuitos. Donde se relacionan la intensidad eléctrica con el calor transferido por unidad de tiempo y superficie (W/m^2), la diferencia de voltaje con la diferencia de temperaturas y la resistencia eléctrica con la capacidad de transmitir energía

calorífica de un medio. Para la conductividad unidireccional térmica podremos definir la siguiente analogía a la *ley de Ohm* expresada en $(m^2 K/W)^2$.

$$R_{cond} = \frac{T_2 - T_1}{q''_x} = \frac{L}{k} \quad (4.3)$$

En el caso de que la pared esté compuesta por distintas capas planas de materiales, como se ve en la *figura 4.2*, podremos considerar cada capa como una resistencia en serie. Por lo tanto, si aplicamos la teoría de circuitos podemos deducir que la resistencia equivalente de la pared será el sumatorio de todas las resistencias.

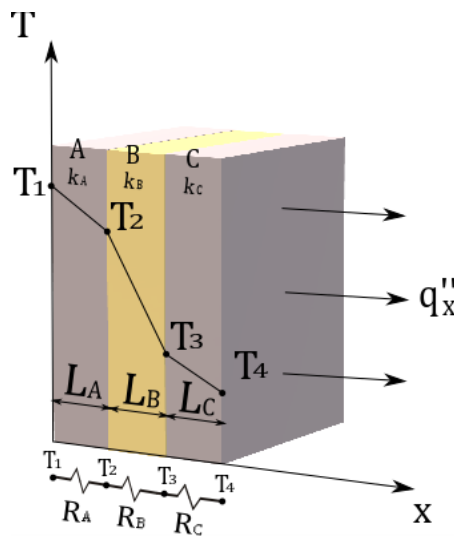


Figura 4.2: Conducción unidimensional en pared plana compuesta con circuito en serie equivalente.

$$R_{total} = \sum_i^n R_i \quad (4.4)$$

Esta expresión simplifica bastante el análisis resumiendo las resistencias térmicas del cerramiento en una equivalente. En el análisis de sistemas compuestos es común y conveniente trabajar con un coeficiente global de transferencia de calor, U ($W/m^2 K$), que se define como

$$U = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_{sup\ ext} + \sum_i^n R_i + R_{sup\ int}} \quad (4.5)$$

² En otras referencias podemos encontrar que la resistencia térmica toma unas unidades de (K/W) pero para este trabajo se ha decidido conservar la dependencia de la superficie por motivos de interés del flujo de calor por unidad de superficie y simplificación.

En este coeficiente se incluyen generalmente las resistencias superficiales (convección y radiación) como observamos en la *ecuación 4.5*. La expresión del flujo de calor asociado a este coeficiente es

$$q_x'' = U(T_2 - T_1) \quad (4.6)$$

4.2. Descripción práctica

La conducción es un mecanismo de transmisión de calor que se aplica a todos los cerramientos e incluso al suelo. Es el encargado de relacionar térmicamente el interior de un edificio con sus alrededores. Por ello, se trata de un análisis común y fundamental para averiguar el desarrollo térmico de un edificio.

En primer lugar, analizaremos el calor conducido por los cerramientos de paredes y cubierta. Para ello se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se establecerá un convenio de signo positivo para todos flujos de calor entrantes a la nave y de signo negativo para los salientes (este convenio se aplicará a lo largo de todo el trabajo).
- Se considerará una transmisión de calor por conducción unidimensional.
- La pared se considerará plana y homogénea en todas sus posibles capas y sin ningún tipo de generación de calor interna.
- Se despreciará la transmisión de calor por las esquinas: Para analizar la transmisión de calor por las esquinas que forman las paredes contiguas hay que elaborar un modelo de transmisión bidireccional, lo cual añade complejidad al estudio. Sin embargo, para este trabajo se considerará despreciable su influencia frente a la transmisión que tienen los propios cerramientos, cuyos valores son mucho mayores.
- Se despreciará la transmisión de calor por los puentes térmicos: Los puentes térmicos hacen referencia a cualquier tipo de variación en los cerramientos que provoca una reducción de la resistencia térmica. Algunos ejemplos son los pilares integrados en los cerramientos, marcos de ventanas y lucernarios, cajas de persianas, frentes de forjado, juntas, etc. Para poder considerarlos hay que entrar en el detalle constructivo de cada nave industrial, lo cual queda excluido de los objetivos de este trabajo.
- Al tratar con datos horarios se evaluará en régimen permanente para cada hora.
- El cálculo de las resistencias se hará mediante la *ecuación 4.3* siendo L igual al espesor de la pared para cerramientos de un solo material e igual al espesor del

aislamiento en caso de tenerlo debido a que la suma de las demás resistencias serán insignificantes frente a la del aislamiento.

Para temperaturas superficiales constantes horarias (externas e internas) en los cerramientos, la transmisión de calor por conducción se expresa como

- Expresión general

$$q''_{cond\ i} = \frac{(T_{i\ ext} - T_{i\ int})}{R_i} \quad (4.7)$$

- Expresiones específicas

$$q''_{cond\ c} = \frac{(T_{c\ ext} - T_{c\ int})}{R_c} \quad (4.8)$$

$$q''_{cond\ PN} = \frac{(T_{PN\ ext} - T_{PN\ int})}{R_p} \quad (4.9)$$

$$q''_{cond\ PS} = \frac{(T_{PS\ ext} - T_{PS\ int})}{R_p} \quad (4.10)$$

$$q''_{cond\ PE} = \frac{(T_{PE\ ext} - T_{PE\ int})}{R_p} \quad (4.11)$$

$$q''_{cond\ PO} = \frac{(T_{PO\ ext} - T_{PO\ int})}{R_p} \quad (4.12)$$

Para calcular el calor conducido por el suelo o solera del edificio es necesario realizar un análisis diferente al del resto de cerramientos. Se trata de una transmisión de calor bidimensional, que se produce entre el aire del interior de la nave y el exterior a través del terreno. El CTE propone un método simplificado para el cálculo de transmisión de calor en soleras con un modelo unidimensional parecido a los que hemos tratado anteriormente. Este modelo tiene tabulado el coeficiente global de transferencia de calor en función de un parámetro característico B' y la resistencia térmica R_a de la banda perimetral de aislamiento puesta en el terreno. Este método de cálculo se especifica en detalle en *Cálculo de parámetros característicos en la envolvente* [28] y será el método utilizado para hallar la transferencia de calor a través de la solera.

El parámetro B' se define como

$$B' = \frac{A_s}{\frac{1}{2}P_s} \quad (4.13)$$

Donde A_s (m^2) y P_s (m) son el área y perímetro de la solera respectivamente.

Las bandas de aislamiento perimetral de longitud D se pueden disponer en posición vertical u horizontal como se puede observar en la *figura 4.3*.

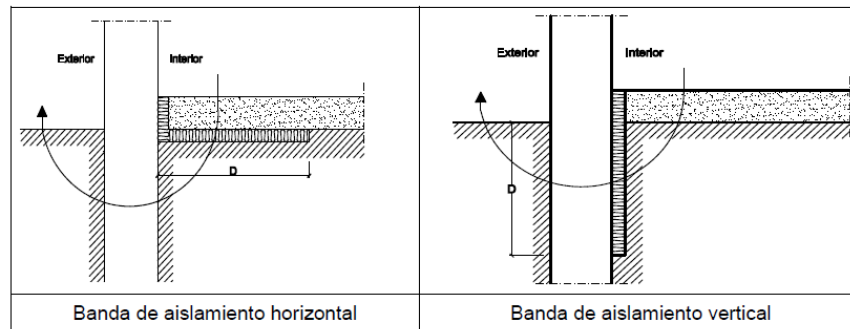


Figura 4.3: Banda de aislamiento perimetral [28, Fig. 1].

La resistencia térmica del aislamiento perimetral R_a se define como

$$R_a = \frac{e}{k} \quad (4.14)$$

Donde e y k hacen referencia al espesor y a la conductividad térmica de la banda de aislamiento.

TABLA 4.1: TRANSMITANCIA TÉRMICA
 U_s (W/m^2K) [28, Tabla 3]

B'	R _a	D = 0.5 m						D = 1.0 m					D ≥ 1.5 m					
		R _a (m²·K/ W)						R _a (m²·K/ W)					R _a (m²·K/ W)					
		0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	
1	2,35	1,57	1,30	1,16	1,07	1,01	1,39	1,01	0,80	0,66	0,57	-	-	-	-	-		
2	1,56	1,17	1,04	0,97	0,92	0,89	1,08	0,89	0,79	0,72	0,67	1,04	0,83	0,70	0,61	0,55		
3	1,20	0,94	0,85	0,80	0,78	0,76	0,88	0,76	0,69	0,64	0,61	0,85	0,71	0,63	0,57	0,53		
4	0,99	0,79	0,73	0,69	0,67	0,65	0,75	0,65	0,60	0,57	0,54	0,73	0,62	0,56	0,51	0,48		
5	0,85	0,69	0,64	0,61	0,59	0,58	0,65	0,58	0,54	0,51	0,49	0,64	0,55	0,50	0,47	0,44		
6	0,74	0,61	0,57	0,54	0,53	0,52	0,58	0,52	0,48	0,46	0,44	0,57	0,50	0,45	0,43	0,41		
7	0,66	0,55	0,51	0,49	0,48	0,47	0,53	0,47	0,44	0,42	0,41	0,51	0,45	0,42	0,39	0,37		
8	0,60	0,50	0,47	0,45	0,44	0,43	0,48	0,43	0,41	0,39	0,38	0,47	0,42	0,38	0,36	0,35		
9	0,55	0,46	0,43	0,42	0,41	0,40	0,44	0,40	0,38	0,36	0,35	0,43	0,39	0,36	0,34	0,33		
10	0,51	0,43	0,40	0,39	0,38	0,37	0,41	0,37	0,35	0,34	0,33	0,40	0,36	0,34	0,32	0,31		
12	0,44	0,38	0,36	0,34	0,34	0,33	0,36	0,33	0,31	0,30	0,29	0,36	0,32	0,30	0,28	0,27		
14	0,39	0,34	0,32	0,31	0,30	0,30	0,32	0,30	0,28	0,27	0,27	0,32	0,29	0,27	0,26	0,25		
16	0,35	0,31	0,29	0,28	0,27	0,27	0,29	0,27	0,26	0,25	0,24	0,29	0,26	0,25	0,24	0,23		
18	0,32	0,28	0,27	0,26	0,25	0,25	0,27	0,25	0,24	0,23	0,22	0,27	0,24	0,23	0,22	0,21		
≥20	0,30	0,26	0,25	0,24	0,23	0,23	0,25	0,23	0,22	0,21	0,21	0,25	0,22	0,21	0,20	0,20		

Si una edificación carece de aislamiento perimetral su resistencia será nula, $R_a = 0 \text{ m}^2 K / W$. Este suele ser el caso que encontramos en naves industriales. Por ello, en este trabajo asumiremos que la nave carece de este tipo de aislamiento. Para obtener más

valores posibles del coeficiente de transferencia se han ajustado los datos para $R_a = 0 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ a una función potencial, cuya ecuación es

$$y = 2,5385 x^{-0,703} \quad (4.15)$$

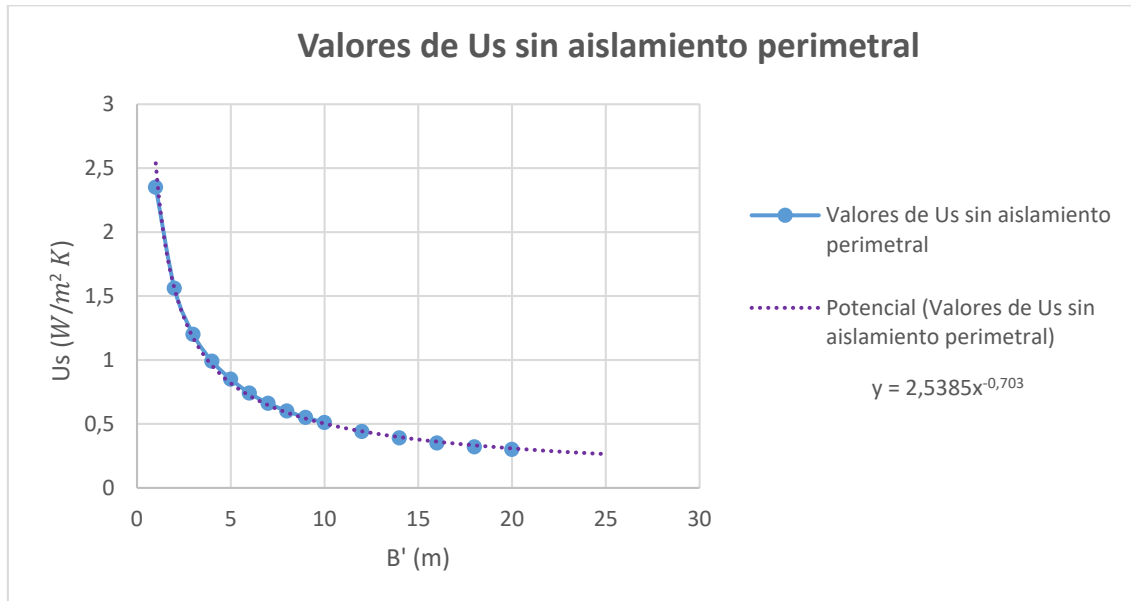


Figura 4.4: Ajuste del modelo potencial a los datos tabulados del coeficiente de transmisión

La figura 4.4 nos muestra como el modelo potencial se ajusta de forma bastante precisa a los datos tabulados de la *tabla 4.1*.

TABLA 4.2: COMPARACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN TABULADO EN EL CTE Y EL MODELO AJUSTADO.

B'	U_s - CTE	U_s - Potencial	Desviación	Peso de la desviación
1	2,35	2,54	0,19	8%
2	1,56	1,56	0,00	0%
3	1,20	1,17	0,03	2%
4	0,99	0,96	0,03	3%
5	0,85	0,82	0,03	4%
6	0,74	0,72	0,02	3%
7	0,66	0,65	0,01	2%
8	0,60	0,59	0,01	2%
9	0,55	0,54	0,01	2%
10	0,51	0,50	0,01	1%
12	0,44	0,44	0,00	1%
14	0,39	0,40	0,01	2%
16	0,35	0,36	0,01	3%
18	0,32	0,33	0,01	4%
20	0,30	0,31	0,01	3%
Promedio:			0,03	3%
Desviación típica:			0,04	2%

En la *tabla 4.2* se puede observar como los valores estimados por el modelo ajustado se aproximan con un tolerancia muy pequeña, que representa un 3% de desviación media con un 2% de desviación típica (límite superior 5%). Por consiguiente, es razonable considerar el modelo potencial para calcular U_S en función de B' .

$$U_S = 2,5385 B'^{-0,703} \quad (4.16)$$

Este coeficiente de transmisión global representa el flujo de calor que sale o entra al local por metro cuadrado de solera y por 1 K de diferencia de temperatura entre el interior de la nave y el ambiente exterior. Según la *ecuación 4.6* el flujo de calor para la solera es

$$q_S'' = U_S(T_{ext} - T_{amb}) \quad (4.17)$$

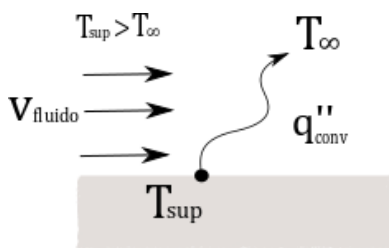
Donde T_{amb} representa la temperatura media del aire ambiente en el interior de la nave, °C.

5. TRASMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN

5.1. Fundamentos teóricos

La convección se define como el mecanismo de transferencia de calor que se da cuando se encuentran una superficie de un cuerpo y un fluido en movimiento. Es producida por la transferencia de energía del movimiento molecular aleatorio y por el movimiento relativo del fluido respecto a una superficie. El flujo de calor de este mecanismo es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido y a un coeficiente pelicular. Para un análisis en estado estacionario se puede definir mediante la *ley de enfriamiento de Newton*.

$$q'' = h (T_{sup} - T_{\infty}) \quad (5.1)$$



Donde q'' representa el flujo de calor (W/m^2), h es el coeficiente de convección (W/m^2K), T_{sup} y T_{∞} la temperatura de la superficie y la del fluido respectivamente. La *ecuación 5.1* está expresada de tal forma que se considera positiva la transferencia de calor hacia el fluido.

Figura 5.1: Transferencia de calor por convección.

Podemos observar según la *ecuación 5.1* que cuanto mayor sea el coeficiente de convección y/o la diferencia de temperaturas entre el fluido y la superficie, mayor será la transferencia de calor.

El coeficiente de convección o de película depende de muchos factores, como las propiedades y velocidad del fluido, la rugosidad de la superficie, las temperaturas, etc. Por esto mismo se trata de un concepto muy amplio y variable que debe analizarse de forma concreta para cada caso. Explicaremos brevemente dos de los casos que pudieran afectar al tipo de convección dada en edificaciones.

Convección forzada

Primero hablaremos de la convección en flujo externo y paralelo a una placa plana. Encontramos este caso siempre que tengamos un fluido recorriendo en dirección paralela una placa plana con una velocidad v (m/s). Este puede ser el caso del viento recorriendo una pared de un edificio. Podemos encontrar tres tipos de régimen de flujo: laminar, mixto o turbulento. Cuando el problema se estudia en estado estacionario, la temperatura superficial se considera homogénea y constante. El valor de Nusselt general (asumiremos que la velocidad del fluido es constante a lo largo de la placa) se define para cada régimen como:

➤ Laminar

$$\overline{Nu}_L = 0,664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (5.2)$$

➤ Mixto

$$\overline{Nu}_L = (0,037 Re_L^{4/5} - 871) Pr^{1/3} \quad (5.3)$$

➤ Turbulento

$$\overline{Nu}_L = 0,037 Re_L^{4/5} Pr^{1/3} \quad (5.4)$$

Donde \overline{Nu}_L , Re_L y Pr son los números adimensionales de Nusselt, Reynolds y Prandtl respectivamente y L es la dimensión característica (m) .

El número adimensional de Nusselt se define como

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} \quad (5.5)$$

Donde \bar{h} es el coeficiente de convección general (se asume constante a lo largo de la placa) y k es la conductividad térmica del fluido.

El número adimensional de Reynolds se define como

$$Re_L = \frac{v L}{\nu} \quad (5.6)$$

Donde v y ν son la velocidad y viscosidad cinemática del fluido respectivamente.

Convección libre

En segundo lugar hablaremos de la convección libre o natural. Donde esta vez el fluido no se encuentra sometido a ningún tipo de flujo forzado, si no que la única velocidad desarrollada en el mismo se debe a la existencia de diferencias de temperatura en el fluido en presencia de fuerzas gravitacionales. La densidad del fluido disminuye con el incremento de temperatura. La existencia de distintas densidades en el mismo fluido genera unas fuerzas de empuje que inducen las corrientes de convección libre. A pesar de su existencia en edificaciones, la transferencia de calor por convección libre se considerará despreciable en este trabajo. Se debe a que por norma general, la transferencia de calor por convección natural adquiere unos valores muy pequeños ($h \ll 1$) y frente a la existencia de convección forzada hace que su aportación sea insignificante.

Métodos alternativos

Sin embargo, debido a la complejidad que añaden al análisis se han establecido valores por defecto para cumplir las sollicitaciones de cálculo en edificaciones. En España podemos encontrar estos valores en [28] y en la publicación [15]. Este último, establece una guía para programas alternativos a los de actual referencia LIDER y CALENDER, donde establecen coeficientes de película constantes para todo el año, tanto para el exterior como el interior del edificio.

$$h_{ext} = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{int} = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Cabe señalar que los documentos anteriormente nombrados también incluyen valores por defecto para las resistencias superficiales. Estas además de la influencia de la convección superficial tienen en cuenta la resistencia radiante de las superficies, que en este trabajo se calcula su efecto de forma separada, con lo cual no son de interés en este estudio.

5.2. Descripción práctica

Se puede encontrar este mecanismo de transmisión de calor en las superficies exteriores e interiores de cada cerramiento por lo que se realizarán sus respectivos análisis por separado. Antes de continuar con su análisis, se han establecido dos hipótesis posibles de cálculo:

- Hipótesis 1: Considerar los coeficientes de convección dados por el documento [15] para todas las localizaciones, horas y épocas del año ($h_{ext} = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $h_{int} = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$).
- Hipótesis 2: Calcular el coeficiente de convección mediante un modelo de convección forzada en placa plana con flujo paralelo y régimen permanente.

5.2.1. Convección exterior

La convección en el exterior de la nave es causada por la existencia de viento en contacto con los cerramientos. El valor de la velocidad del viento puede variar según la localización y el día. Recordemos que, este valor forma parte de los parámetros horarios dados por la Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo del Ministerio de Fomento [3]. Por lo tanto, para el desarrollo del cálculo del coeficiente de convección se asumirá la *hipótesis 2*. Se trata de un modelo de cálculo que no añade mucha complejidad y se ajusta mucho más a la realidad que la *hipótesis 1*. Para la *hipótesis 2* se han tomado las siguientes consideraciones:

- La longitud característica para los cerramientos de las paredes equivale a su dimensión paralela al terreno. Para el cerramiento de la cubierta equivale a su dimensión mayor. Asumir estas longitudes características implica asumir que las velocidades del viento siempre tomarán esa dirección cuando estén en contacto con sus respectivos cerramientos (*figura 5.2*). Esta consideración se adaptará a la realidad en muchos casos pero, aunque en otros casos no se adapte, el margen de error para el coeficiente de convección que se puede obtener para las velocidades

con las que trabajamos es como mucho de $\pm 1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (figura 5.3). Este error es asumible si comparamos la complejidad de cálculo de este método con el de otras consideraciones posibles que se adapten más a la realidad.

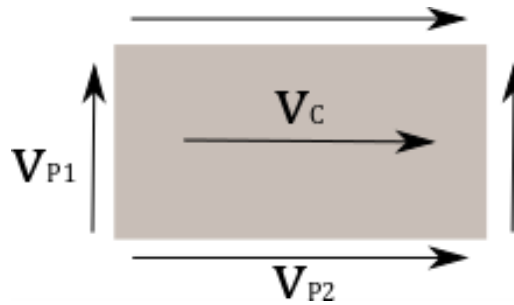


Figura 5.2: Dirección del viento establecida para cada cerramiento (Nave vista desde el cielo).

- Las velocidades no varían con la altura debido a su complejidad computacional para definir la transmisión de calor a lo alto de las paredes y, además, con la altura de una nave industrial por lo general las velocidades no llegan a variar de manera significativa.

En primer lugar, definiremos el cálculo del coeficiente de convección para posteriormente expresar el flujo de calor transferido por convección

Para definir la expresión que determina el valor del Nusselt para cada cerramiento i es necesario comprobar el tipo de régimen en el que se encuentra el fluido.

$$\overline{Nu}_{Li} = \frac{\bar{h}_{i \text{ ext}} L_i}{k_{\text{aire}}} \quad (5.7)$$

El valor de Re_{Li} a partir del cual se estima que el flujo comienza a ser turbulento en flujo externo es de 5×10^5 , al cual denominaremos Re_{cr} por ser crítico. Ahora, su expresión determina la dimensión característica crítica en función de la velocidad del aire.

$$Re_{cr} = \frac{v_{\text{aire ext}} X_{cr}}{\nu_{\text{aire}}} \quad (5.8)$$

Este valor de X_{cr} determinará el tipo de flujo de forma condicional de la siguiente manera:

- Si $X_{cr} \leq 0,05 L_i \rightarrow$ Flujo laminar (ecuación 5.2)

$$\overline{Nu}_{Li} = 0,664 Re_{Li}^{1/2} Pr_{\text{aire}}^{1/3} \quad (5.9)$$

- Si $0,05 L < X_{cr} < 0,95 L_i \rightarrow$ Flujo en condiciones mixtas (ecuación 5.3)

$$\overline{Nu}_{Li} = (0,037 Re_{Li}^{4/5} - 871) Pr_{\text{aire}}^{1/3} \quad (5.10)$$

➤ Si $X_{cr} \geq 0,95 L_i \rightarrow$ Flujo turbulento (ecuación 5.4)

$$\overline{Nu}_{Li} = 0,037 Re_{Li}^{4/5} Pr_{aire}^{1/3} \quad (5.11)$$

Donde Re_{Li} es

$$Re_{Li} = \frac{v_{aire\ ext} L_i}{\nu_{aire}} \quad (5.12)$$

Las longitudes características para cada cerramiento corresponden a

Cubierta: $L_C = Largo (Re_{LC} \text{ y } \overline{Nu}_{LC})$

Pared 1: $L_{P1} = Ancho (Re_{LP1} \text{ y } \overline{Nu}_{LP1})$

Pared 2: $L_{P2} = Largo (Re_{LP2} \text{ y } \overline{Nu}_{LP2})$

Por último, si consideramos que $L_C = L_{P2}$ podemos deducir que

$$\bar{h}_{P2\ ext} = \bar{h}_{C\ ext} \quad (5.13)$$

Por definición, también sabemos que

$$\bar{h}_{PN\ ext} = \bar{h}_{PS\ ext} = \bar{h}_{P1\ ext}$$

$$\bar{h}_{PE\ ext} = \bar{h}_{PO\ ext} = \bar{h}_{P2\ ext}$$

Puntualicemos que se debe a que estos cerramientos comparten misma velocidad del aire y misma longitud característica.

Llegados a este punto, ya se han definido las ecuaciones que determinan los coeficientes de convección horarios. Para conocer un poco más a fondo el comportamiento del coeficiente de convección, se han elaborado unos gráficos que relacionan dicho coeficiente con la longitud característica de la pared para cuatro velocidades. Las cuales se encuentran dentro del rango común según los datos meteorológicos para todas las zonas climáticas en España.

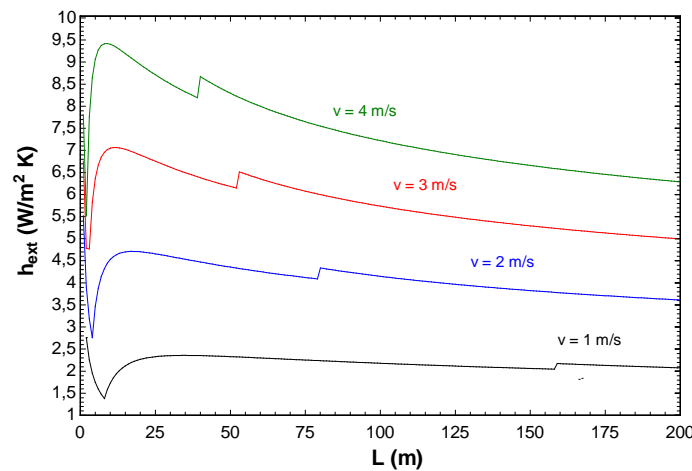


Figura 5.3: Desarrollo del coeficiente de convección externo para distintas velocidades.

Podemos observar en la *figura 5.3* que el coeficiente de convección para estas velocidades está lejos del valor constante que se asumiría en la *hipótesis 1*. Por lo que en este estudio los valores normales se encontrarán en el rango $[2, 10] \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$.

Se pueden distinguir en el gráfico perfectamente los tres tipos de flujos que podemos encontrar, laminar, mixto y turbulento. Su cambio de curvatura indica el tipo de régimen. Para dimensiones menores a 10 m se encuentra el régimen laminar con pendiente negativa, a partir de él se desarrollan las condiciones mixtas de transferencia donde se encuentra el máximo de la función. Por otra parte, para las dimensiones mayores se encuentra el régimen turbulento. Esto se puede observar con mayor claridad en la *figura 5.4*.

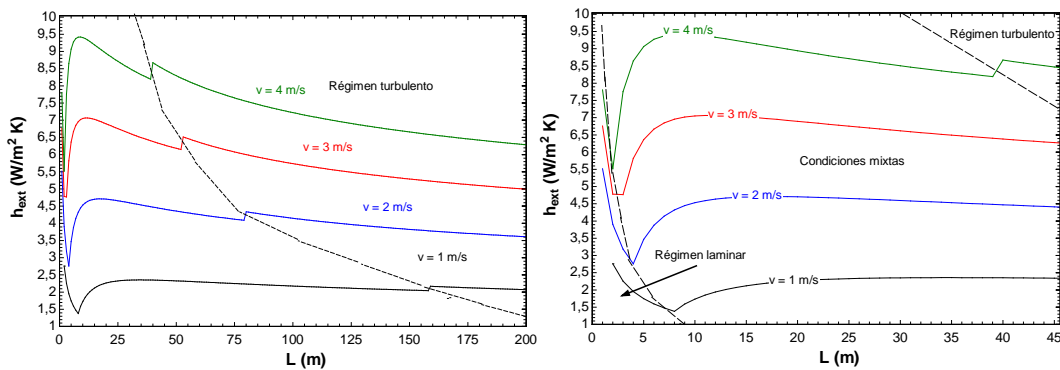


Figura 5.4: Delimitación de la *figura 5.3* mostrando las regiones con régimen laminar, mixto y turbulento.

El flujo de calor es consecuencia de la diferencia de temperatura entre las superficies exteriores de los cerramientos y el aire exterior, dato extraído de los datos meteorológicos como la temperatura seca. La expresión para el cálculo de transferencia de calor por convección en el exterior viene dada por la *ecuación 5.14*.

- Expresión general

$$q''_{conv i ext} = \bar{h}_{i ext} (T_{ext} - T_{i ext}) \quad (5.14)$$

- Expresiones específicas

$$q''_{conv C ext} = \bar{h}_{C ext} (T_{ext} - T_{C ext}) \quad (5.15)$$

$$q''_{conv PN ext} = \bar{h}_{P1 ext} (T_{ext} - T_{PN ext}) \quad (5.16)$$

$$q''_{conv PS ext} = \bar{h}_{P1 ext} (T_{ext} - T_{PS ext}) \quad (5.17)$$

$$q''_{conv PE ext} = \bar{h}_{P2 ext} (T_{ext} - T_{PE ext}) \quad (5.18)$$

$$q''_{conv PO ext} = \bar{h}_{P2 ext} (T_{ext} - T_{PO ext}) \quad (5.19)$$

5.2.2. Convección interior

La transferencia de calor por convección en el interior de la nave puede ser determinado por corrientes de aire generadas por diversas causas. Un ejemplo común en naves industriales es la existencia de ventilación forzada pero también cobran gran importancia las corrientes de convección libre. No todas las superficies interiores estarán sometidas a las mismas condiciones, pero sí que sus efectos serán muy similares. También las condiciones cinemáticas del viento permanecen prácticamente constantes a lo largo del día y del año. Por consiguiente, se ha elegido la *hipótesis 1* para el cálculo de la transmisión de calor por convección, donde $h_{int} = 2 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ para todas las superficies interiores.

Esta vez, el flujo se origina debido a la diferencia de temperatura entre las superficies interiores y el aire ambiente de la nave. La ecuación para el cálculo de transferencia de calor por convección en el interior de la nave viene dada por la *ecuación 5.20*.

- Expresión general

$$q''_{conv i int} = \bar{h}_{int} (T_{i int} - T_{amb}) \quad (5.20)$$

- Expresiones específicas

$$q''_{conv C int} = \bar{h}_{int} (T_{C int} - T_{amb}) \quad (5.21)$$

$$q''_{conv S int} = \bar{h}_{int} (T_{S int} - T_{amb}) \quad (5.22)$$

$$q''_{conv PN int} = \bar{h}_{int} (T_{PN int} - T_{amb}) \quad (5.23)$$

$$q''_{conv PS int} = \bar{h}_{int} (T_{PS int} - T_{amb}) \quad (5.24)$$

$$q''_{conv PE int} = \bar{h}_{int} (T_{PE int} - T_{amb}) \quad (5.25)$$

$$q''_{conv PO int} = \bar{h}_{int} (T_{PO int} - T_{amb}) \quad (5.26)$$

6. TRSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN

6.1. Fundamentos teóricos

La radiación térmica es la energía en forma de ondas electromagnéticas que emite todo cuerpo solo por encontrarse a una cierta temperatura. Esta energía también puede ser desarrollada por líquidos y gases, aunque nos centraremos en el análisis de los cuerpos sólidos ya que serán los más significantes para este trabajo. La cantidad de energía asociada a este proceso viene definida por la *ley de Stefan-Boltzmann*.

$$E = \varepsilon \sigma T_{sup}^4 \quad (6.1)$$

Donde E es la potencia emisiva (W/m^2), σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2K$), T_{sup} es la temperatura superficial del cuerpo y ε la emisividad o emitancia, una propiedad del material y del tipo de acabado superficial, con rango $0 < \varepsilon < 1$. Las superficies con una emisividad igual a la unidad adquieren el nombre de cuerpos negros, y como podemos deducir, estos son los que marcan el límite superior de la potencia que puede emitir una superficie para cualquier T_{sup} .

La superficie de un cuerpo no solo emite radiación, sino que también recibirá irradiación de sus alrededores. A este flujo de energía incidente en la superficie se le denominará irradiación asignándole el símbolo G (W/m^2). Una vez que la energía ha incidido en la superficie se pueden dar tres sucesos: parte de la radiación se refleja debido a las propiedades superficiales del cuerpo sin tener ningún efecto térmico en el mismo; parte de la irradiación es absorbida por el material convirtiéndose así la energía electromagnética en energía térmica; el material no es completamente opaco y permite que parte de la radiación incidente traspase el cuerpo. Estos tres conceptos se pueden definir como propiedades del material en función de la longitud de onda electromagnética de la irradiación y expresarse con valores fraccionarios.

$$1 = \rho + \tau + \alpha \quad (6.2)$$

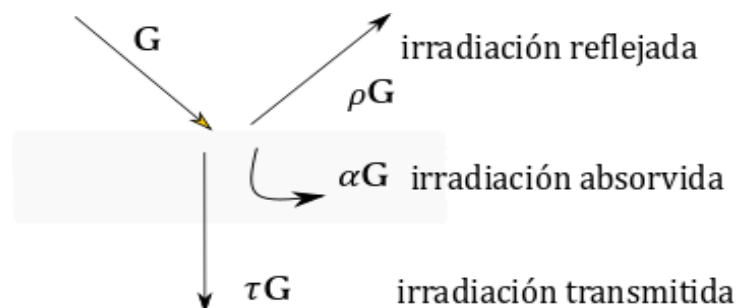


Figura 6.1: Desarrollo de la irradiación cuando incide en una superficie semitransparente.

Donde ρ es la fracción de irradiación reflejada por superficie o reflectancia, τ es la fracción de irradiación transmitida por el cuerpo o transmitancia y α es la fracción de irradiación absorbida o absorbancia.

La radiosidad con símbolo J (W/m^2) se define como el flujo de radiación total que parte de una superficie. Por lo tanto, se escribirá como el sumatorio de la radiación emitida por la superficie y la irradiación reflejada.

$$J = E + \rho G \quad (6.3)$$

Una vez definidos estos conceptos, el flujo de calor neto por radiación en una superficie se define como la energía saliente menos la energía entrante.

$$q'' = J - (1 - \tau)G \quad (6.4)$$

$$q'' = E + (\rho + \tau - 1)G \quad (6.5)$$

$$q'' = E - \alpha G \quad (6.6)$$

Este flujo se asume positivo para energía saliente. Para el caso en el que tengamos superficies opacas ($\tau = 0$ y $\alpha = \rho - 1$).

$$q'' = J - G \quad (6.7)$$

También podemos expresarlo en función de la reflectancia como

$$q'' = E - (\rho - 1)G \quad (6.8)$$

Para poder cuantificar la irradiación de una superficie, es necesario definir sus alrededores, dado que la irradiación en una superficie es la radiosidad de sus alrededores.

Para el caso en el que se la irradiación se asemeje a la emisión de un cuerpo negro (σT_{alr}^4) y la superficie en la que incide sea opaca, la transferencia de calor en la superficie es

$$q'' = \sigma[\varepsilon T_{sup}^4 - (\rho - 1)T_{alr}^4] \quad (6.8)$$

Cuando la superficie es tal que $\alpha = \varepsilon$ (superficie gris) obtenemos la ecuación 6.10.

$$q'' = \varepsilon \sigma (T_{sup}^4 - T_{alr}^4) \quad (6.9)$$

Un ejemplo de aplicación de esta última expresión son las superficies expuestas solamente al cielo, ya que su emisión se puede considerar igual a la de un cuerpo negro y en muchos casos las superficies estudiadas se pueden tratar como superficies grises. Esta última consideración se debe a que, por lo general, el rango de temperatura terrestre y de cielo (de 230 K a 320 K) es suficientemente pequeño como para considerar que la irradiación se concentre en aproximadamente la misma región espectral que la emisión, por lo que es razonable suponer que $\alpha = \varepsilon$. Sin embargo, existen casos para los que la superficie gris no es siempre aplicable. En una situación en la que aparezca irradiación proveniente del sol, que es cuerpo celeste que se encuentra aproximadamente a 5800 K, la diferencia de temperaturas es tan grande que la región espectral de la irradiación solar y de la emisividad de cualquier superficie terrestre difieren significativamente. Para este caso será necesario establecer valores para ρ_{solar} y α_{solar} . Recordemos que ρ y α dependen de la longitud de onda incidente y por lo tanto de su respectiva distribución espectral, que a su vez depende de la temperatura de la fuente de radiación.

Por otro lado, cuando dos o más superficies intercambian radiación entre ellas la colocación en el espacio de las mismas determinará la fracción de radiación intercambiada, siempre y cuando supongamos que las superficies emiten de manera difusa (igual potencia emisiva en todas las direcciones). De esta idea surge el concepto de factor de visión o de forma F_{ij} , quien toma valores en el rango $0 < F_{ij} < 1$, siendo i la superficie que emite la radiación y j quien la recibe. La suma de todos los factores tiene que ser igual a la unidad.

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (6.10)$$

Para el cálculo de los factores de forma podemos encontrar diversas situaciones según la disposición del espacio. Para este estudio analizaremos dos de las situaciones más comunes que podemos encontrar en edificación extraídas de Incropera [16] y Mills [17].

- Paredes paralelas y alineadas: Los parámetros X , Y y L definen el factor de forma de la superficie i a la superficie j .

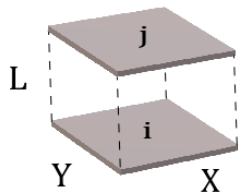


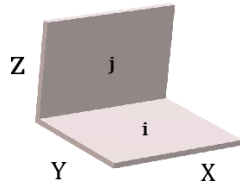
Figura 6.2: Factor de forma para paredes paralelas y alineadas

$$\bar{X} = \frac{X}{L} \quad (6.11)$$

$$\bar{Y} = \frac{Y}{L} \quad (6.12)$$

$$F_{ij} = \frac{2}{2\bar{X}\bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} + \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \left[\frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} \right] + \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \left[\frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} \right] - \bar{X} \tan^{-1}(\bar{X}) - \bar{Y} \tan^{-1}(\bar{Y}) \right\} \quad (6.13)$$

- Paredes perpendiculares con una orilla común: Los parámetros X , Y y Z definen el factor de forma de la superficie i a la superficie j .



$$H = \frac{Z}{X} \quad (6.14)$$

$$W = \frac{Y}{X} \quad (6.15)$$

Figura 6.3: Factor de forma para paredes perpendiculares con una orilla común.

$$F_{ij} = \frac{1}{\pi W} \left(W \tan^{-1} \left(\frac{1}{W} \right) + H \tan^{-1} \left(\frac{1}{H} \right) - (H^2 + W^2)^{1/2} \tan^{-1} \left[\frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}} \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \ln \left[\frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \right] \left[\frac{W^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right]^{W^2} \left[\frac{H^2(1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2)(H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right) \quad (6.16)$$

Llegados a este punto se podemos expresar la irradiación en la superficie i en función de los factores de forma como

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N A_j F_{ji} J_j \quad (6.17)$$

Donde A_i es el área de la superficie i .

Si aplicamos la relación de reciprocidad ($A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$) a la ecuación 6.18 se cancela el término A_i .

$$G_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j \quad (6.18)$$

Sustituyendo en la ecuación 6.7 obtenemos que el balance de radiación por unidad de área de la superficie i es

$$q_i'' = J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j \quad (6.19)$$

Otra opción es sustituir G_i para la ecuación 6.8.

$$q_i'' = E_i - (\rho_i - 1) \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j \quad (6.20)$$

6.2. Descripción práctica

Este mecanismo de transferencia de calor que se da exclusivamente en las superficies, al igual la convección. Por lo que el análisis se realizará de manera similar a al punto 5.2. *Descripción práctica*, donde se realizará un estudio exterior e interior de las superficies que conciernen a la nave.

6.2.1. Radiación exterior

La transmisión de radiación en las superficies exteriores es uno de los factores más significantes en el cálculo de cargas internas de un edificio. Esto se debe principalmente a la radiación solar, quien puede llegar a proyectar en el plano horizontal unos $1000 \text{ (} W / m^2 \text{)}$ en un día soleado. La suma de este factor y la irradiación de sus alrededores constituye la irradiación total de la cubierta.

La irradiación solar sobre cada cerramiento dependerá de la hora del día y de la época del año en la que ubiquemos el estudio. Los datos meteorológicos publicados por la *Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo del Ministerio de Fomento* [3] definen la posición solar con dos parámetros, azimuth y cenit solar. El Azimut es el ángulo que forma la dirección del sol respecto a la dirección sur, con valores positivos en el sentido oeste y valores negativos en sentido este. El día solar empezará con valores negativos (amanece por el este) y culminará con valores positivos (se pone por el oeste), pasando por el sur ($Azimut = 0^\circ$). Por otro lado, el cenit solar hace referencia al ángulo con el que incide la irradiación solar respecto a la vertical en un punto de la tierra. Este ángulo adquiere mayores máximos diarios en invierno que en verano. De tal modo que un observador verá con menor altura al sol en invierno que en verano.

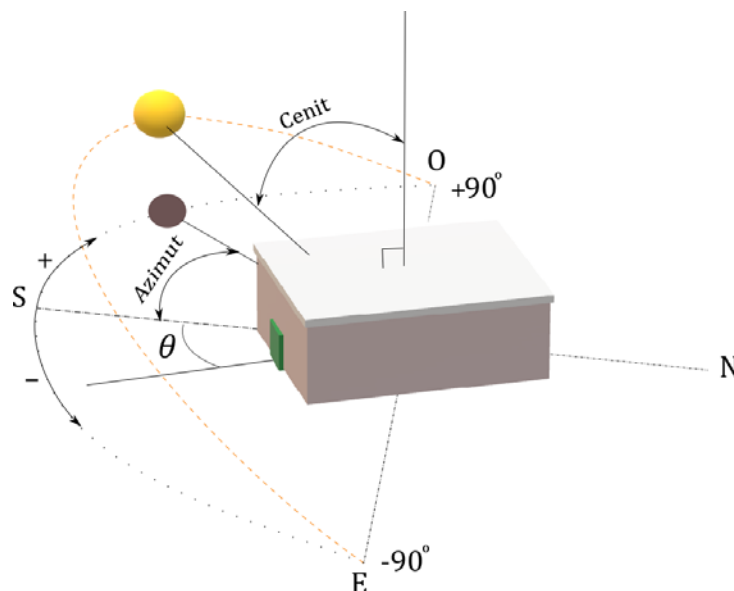


Figura 6.4: Descripción de la orientación de una nave industrial respecto al sol.

Para entender más a fondo el desarrollo de estos conceptos a lo largo del año y de manera más visual, existen métodos gráficos como el analema o las cartas estereográficas. En la *figura 6.5* se muestra una carta estereográfica, donde se representa la elevación en función del azimuth ($elevación = 90 - Cenit$). Se observa como en la época invernal el sol llega a menos elevación que en verano.

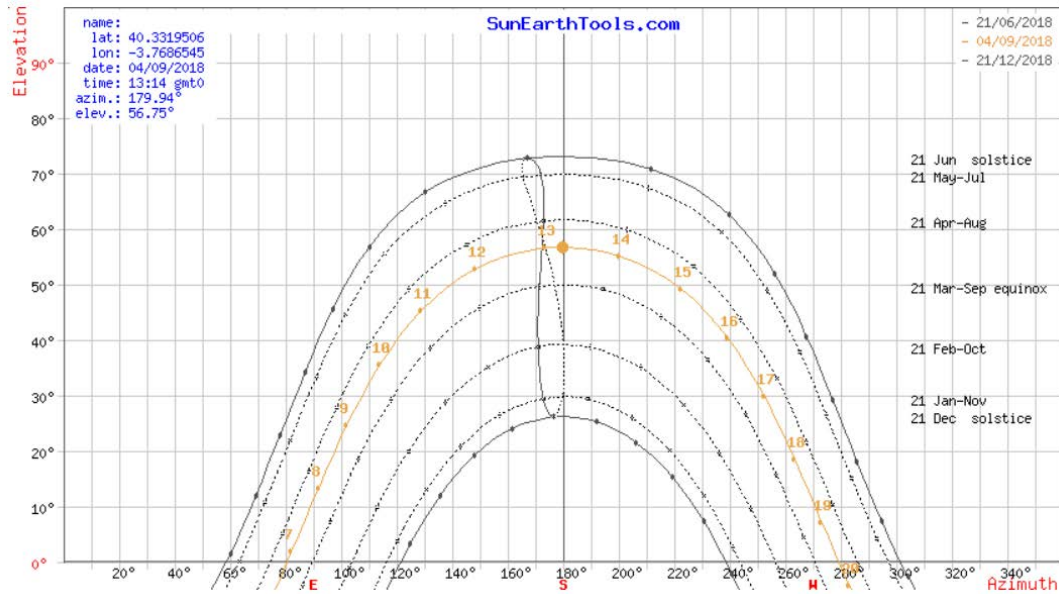


Figura 6.5: Cartas estereográfica en coordenadas cartesianas para el municipio de Leganés, Madrid (SunEarthTools [29]).

La irradiación solar en cada cerramiento se puede determinar a través del azimut, cenit, del ángulo de orientación de la nave y los datos meteorológicos [3], donde encontramos los valores horarios para la irradiación solar directa y difusa. Aunque la radiación difusa obtiene los mismos valores para todos los cerramientos ya que se trata de una radiación solar proveniente del cielo y no de la ubicación del cuerpo celeste en cuestión.

Otro concepto importante ya introducido previamente es el factor de forma. Como ya explicamos, el factor de forma hace referencia a la fracción de calor intercambiado entre una superficie y cada uno de los elementos de sus alrededores. Para hallar estos coeficientes y el resto de los parámetros estudiaremos cada superficie exterior por separado.

Cubierta

La cubierta es un cerramiento con una visión exclusiva al cielo. Por lo que habrá que estudiar la relación de intercambio de calor entre el cielo y la superficie de la cubierta además de la irradiación solar. Para este cerramiento se puede calcular el flujo de calor superficie-cielo de forma directa con la *ecuación 6.9*, o si asumimos que se comporta como una superficie gris con la *ecuación 6.10*. Sin embargo, debido a que no siempre trataremos con superficies grises y dado el objetivo de poder simular nuevos materiales, como aislamientos para la radiación, recurriremos a ecuaciones generales (*ecuación 6.7*) para obtener un estudio homogéneo de la radiación en todas las superficies.

Irradiación solar: Los datos para $G_{solar,D}$ y $G_{solar,d}$ ya vienen con valores para el plano horizontal.

$$G_{solar,C} = G_{solar,D} + G_{solar,d} \quad (6.21)$$

Irradiación total: La emisión del cielo se considera igual a la de un cuerpo negro ($\varepsilon = 1$)

$$G_{C\ ext} = G_{solar,C} + \sigma T_{cielo}^4 \quad (6.22)$$

Potencia emisiva: Según la *ecuación 6.1*.

$$E_{C\ ext} = \varepsilon_{C\ ext} \sigma T_{C\ ext}^4 \quad (6.23)$$

Radiosidad: Aplicando la definición de radiosidad (*ecuación 6.3*) y teniendo en cuenta las distintas fuentes de irradiación se obtiene la *ecuación 6.25*.

$$J_{C\ ext} = E_{C\ ext} + \rho_{solar\ C\ ext} G_{solar,C} + \rho_{C\ ext} \sigma T_{cielo}^4 \quad (6.24)$$

Flujo de radiación neto: Sustituimos en la *ecuación 6.7*.

$$q''_{rad\ C\ ext} = G_{C\ ext} - J_{C\ ext} \quad (6.25)$$

Paredes

Los alrededores de las paredes son mucho más variables y complejos de determinar que los que podemos encontrar para la cubierta. Ya puede ser la existencia de edificios cercanos, muros, vegetación, distintos tipos de terreno y relieve, etc. Por ello mismo se ha considerado para este caso de estudio que la edificación en cuestión se sitúe en una explanada plana sin cuerpos cercanos que puedan proyectar algún tipo de sombra sobre la nave y con una lejanía suficiente para poder considerar su factor de visión nulo en los cerramientos. Por consiguiente, los alrededores restantes se tratarían del terreno circundante y del cielo.

El factor de visión entre el terreno y la pared se puede considerar como el factor entre dos superficies perpendiculares con una orilla común como observamos en la *figura 6.6*. En el caso en que $Z \gg X$, como puede ser el caso de la explanada sin cuerpos cercanos, el factor de visión de la pared al terreno converge en un valor que depende del cociente Y/X , es decir, las dimensiones de la nave.

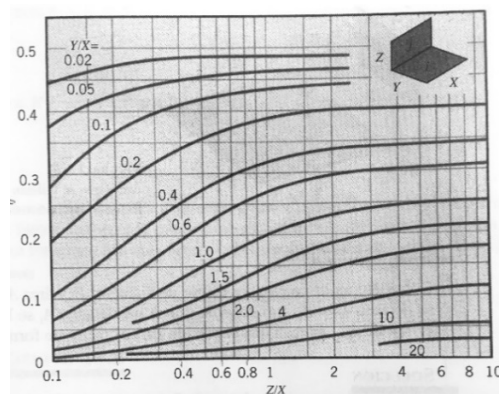


Figura 6.6: Factor de forma para rectángulos paralelos con una orilla común. (Incropera [16])

Para el cálculo de estos factores de forma recurriremos a las *ecuaciones 6.15, 6.16 y 6.17*. Serán utilizadas para hallar los factores F_{P1T} , F_{P2T} , $F_{P1Cielo}$ y $F_{P2Cielo}$. Gracias a la *ecuación 6.11* se pueden deducir las siguientes expresiones:

$$F_{P1Cielo} = 1 - F_{P1T} \quad (6.26)$$

$$F_{P2Cielo} = 1 - F_{P2T} \quad (6.27)$$

Los parámetros característicos de las superficies para el cálculo de sus factores de forma necesarios son:

➤ Pared tipo P1

$X_{P1T} = \text{Ancho}$, $Y_{P1T} = \text{Alto}$ y $Z_{P1T} = \text{longitud terreno para } F_{P1T}$

➤ Pared tipo P2:

$X_{P2C} = \text{Largo}$, $Y_{P2C} = \text{Alto}$ y $Z_{P2C} = \text{longitud terreno para } F_{P2T}$

El valor de *longitud terreno* sabemos que tiene aproximarse a ∞ de tal manera que F_{PiT} sea capaz de converger en un valor para todas las dimensiones de nave posibles. Para hallar este valor se han planteado dos casos extremos, las dimensiones de una nave muy pequeña (40 x 5 x 4m, *figura 6.7*) y de una nave muy grande (1000 x 400 x 30 m, *figura 6.8*). Estas últimas dimensiones se asemejan a las de la fábrica de Boeing Everett, situada en el estado de Washington, EEUU, que actualmente se trata de una de las naves más grande del mundo.

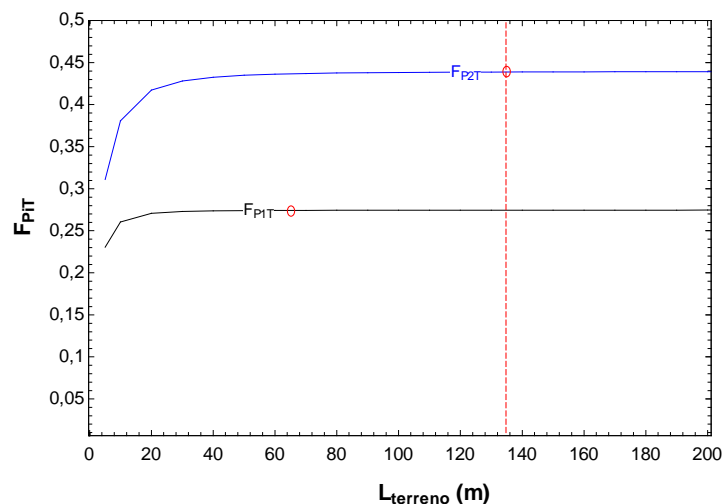


Figura 6.7: Factor de forma F_{P1T} y F_{P2T} en función de la longitud del terreno para una nave pequeña (40 x 5 x 4m).

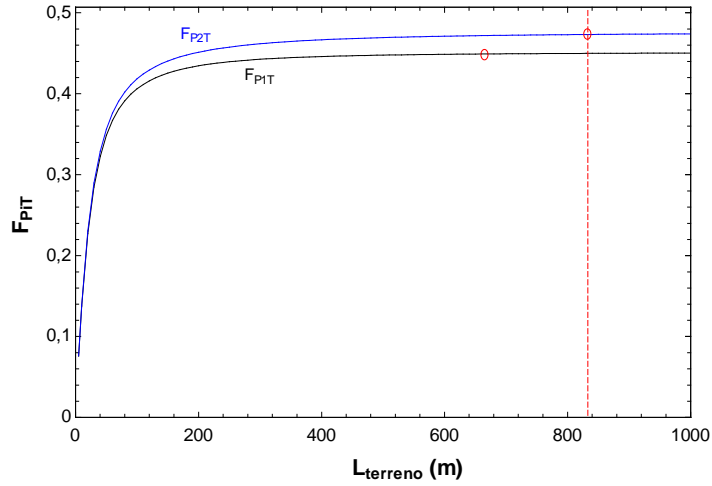


Figura 6.8: Factor de forma F_{P1T} y F_{P2T} en función de la longitud del terreno para una nave grande (1000 x 400 x 30 m).

Para las *figuras 6.6 y 6.7* los puntos rojos representan la longitud a partir de la cual el factor de forma converge en un valor. Las líneas discontinuas denotan la mínima longitud para la que la convergencia se satisface en todas las paredes.

Observando las *figuras 6.6 y 6.7* concluimos que el factor que determina el límite de convergencia es el de la pared tipo P2 y con las características de la nave de mayores dimensiones. Por lo tanto definimos el valor límite en *longitud terreno* ≥ 850 m para establecer el valor de F_{PIT} .

Irradiación solar: Para transformar $G_{solar,D}$ al plano perpendicular de cada cerramiento son necesarias las siguientes transformaciones. Primero es necesario trasladar de la dirección normal a la dirección paralela a la superficie de la tierra [$\tan(Cenit)$]. Posteriormente, hay que ajustar los ángulos de incidencia en el plano horizontal respecto del *Azimuth*, usando los siguientes ángulos

$$\omega_{PN} = |Azimut - \theta + 180| \quad (6.28)$$

$$\omega_{PS} = |Azimut - \theta| \quad (6.29)$$

$$\omega_{PE} = |Azimut - \theta + 90| \quad (6.30)$$

$$\omega_{PO} = |Azimut - \theta - 90| \quad (6.31)$$

Recordemos θ es el ángulo de orientación de la nave. En estas expresiones se ha usado el valor absoluto por simplificación a la hora de definir el dominio. Siempre que el ángulo resultante se encuentre dentro del intervalo $[90, 270]$, $\omega_{Pi} = 90^\circ$, para que los cosenos de la expresión de irradiación solar sean nulos (*ecuación 6.33*). Esto es a causa de que las paredes no reciben radiación solar directa una vez que alcanzados los valores de dicho intervalo.

- Expresión general

$$G_{solar, Pi} = G_{solar, D} \tan(Cenit) \cos(\omega_{Pi}) \quad (6.32)$$

- Expresiones específicas

$$G_{solar, PN} = G_{solar, D} \tan(Cenit) \cos(\omega_{PN}) \quad (6.33)$$

$$G_{solar, PS} = G_{solar, D} \tan(Cenit) \cos(\omega_{PS}) \quad (6.34)$$

$$G_{solar, PE} = G_{solar, D} \tan(Cenit) \cos(\omega_{PE}) \quad (6.35)$$

$$G_{solar, PO} = G_{solar, D} \tan(Cenit) \cos(\omega_{PO}) \quad (6.36)$$

La $G_{solar, d}$ se evaluará esta vez con la irradiación total en cada pared.

Radiosidad del terreno circundante al edificio:

Se define como

$$J_{TPi} = \varepsilon_T \sigma T_T^4 + \rho_T G_T \quad (6.37)$$

Por falta de datos se asumirá que la temperatura del terreno es igual a la de la superficie de la pared que sea visible $T_T = T_{Pi ext}$. De esta forma el intercambio de radiación por emisividad será mínimo con la pared y se justifica en alguna medida la existencia de la sombra que genera la misma nave sobre el terreno.

La irradiación incidente en el terreno se compone de la radiación solar en el plano horizontal y la emisividad del cielo, que es igual a la irradiación que recibe la cubierta. Se considerará insignificante la irradiación reflejada que proviene de la misma pared u otros cuerpos cercanos.

$$\rho_T G_T = \rho_{solar} G_{solar, C} + \rho_T \sigma T_{cielo}^4 \quad (6.38)$$

Finalmente podemos expresar la radiosidad del terreno en cada una de las paredes.

- Expresión general

$$J_{TPi} = \varepsilon_T \sigma T_{Pi ext}^4 + \rho_{solar} G_{solar, C} + \rho_T \sigma T_{cielo}^4 \quad (6.39)$$

- Expresiones específicas

$$J_{TPN} = \varepsilon_T \sigma T_{PN\ ext}^4 + \rho_{solar} T G_{solar,C} + \rho_T \sigma T_{cielo}^4 \quad (6.40)$$

$$J_{TPS} = \varepsilon_T \sigma T_{PS\ ext}^4 + \rho_{solar} T G_{solar,C} + \rho_T \sigma T_{cielo}^4 \quad (6.41)$$

$$J_{TPE} = \varepsilon_T \sigma T_{PE\ ext}^4 + \rho_{solar} T G_{solar,C} + \rho_T \sigma T_{cielo}^4 \quad (6.42)$$

$$J_{TPO} = \varepsilon_T \sigma T_{PO\ ext}^4 + \rho_{solar} T G_{solar,C} + \rho_T \sigma T_{cielo}^4 \quad (6.43)$$

Irradiación total: Se asume que la radiación difusa se proyecta en todas las superficies por igual. Por lo tanto, no es necesario su translación a la dirección normal de las paredes. También asumiremos que su origen de procedencia es el cielo, por lo que se verá sujeta a la influencia del factor de forma $F_{PiCielo}$. Por lo que la irradiación total en este caso es la suma de las aportaciones del sol, cielo y terreno.

- Expresión general

$$G_{Pi\ ext} = G_{solar,Pi} + F_{PiCielo}(\sigma T_{cielo}^4 + G_{solar,d}) + F_{P1T} J_{TPi} \quad (6.44)$$

- Expresiones específicas

$$G_{PN\ ext} = G_{solar,PN} + F_{P1Cielo}(\sigma T_{cielo}^4 + G_{solar,d}) + F_{P1T} J_{TPN} \quad (6.45)$$

$$G_{PS\ ext} = G_{solar,PS} + F_{P1Cielo}(\sigma T_{cielo}^4 + G_{solar,d}) + F_{P1T} J_{TPS} \quad (6.46)$$

$$G_{PE\ ext} = G_{solar,PE} + F_{P2Cielo}(\sigma T_{cielo}^4 + G_{solar,d}) + F_{P2T} J_{TPE} \quad (6.47)$$

$$G_{PO\ ext} = G_{solar,PO} + F_{P2Cielo}(\sigma T_{cielo}^4 + G_{solar,d}) + F_{P2T} J_{TPO} \quad (6.48)$$

Potencia emisiva:

- Expresión general

$$E_{Pi\ ext} = \varepsilon_{P\ ext} \sigma T_{Pi\ ext}^4 \quad (6.49)$$

- Expresiones específicas

$$E_{PN\ ext} = \varepsilon_{P\ ext} \sigma T_{PN\ ext}^4 \quad (6.50)$$

$$E_{PS\ ext} = \varepsilon_{P\ ext} \sigma T_{PS\ ext}^4 \quad (6.51)$$

$$E_{PE\ ext} = \varepsilon_{P\ ext} \sigma T_{PE\ ext}^4 \quad (6.52)$$

$$E_{PO\ ext} = \varepsilon_{P\ ext} \sigma T_{PO\ ext}^4 \quad (6.53)$$

Radiosidad: La expresión de la radiosidad para las paredes será la suma de la emisividad, de lo que refleje proveniente del sol, del cielo y del terreno circundante, teniendo en cuenta en todo momento la fuente de la que proviene la radiación para usar $\rho_{P\ ext}$ o $\rho_{solar\ P\ ext}$.

- Expresión general

$$\begin{aligned} J_{Pi\ ext} = & E_{Pi\ ext} + \rho_{solar\ P\ ext} G_{solar, Pi} + F_{PiCielo} (\rho_{P\ ext} \sigma T_{cielo}^4 \\ & + \rho_{solar\ P\ ext} G_{solar, d}) \\ & + F_{P1T} [\rho_{P\ ext} (\varepsilon_T \sigma T_{Pi\ ext}^4 + \rho_T \sigma T_{cielo}^4) \\ & + \rho_{solar\ P\ ext} \rho_{solar\ T} G_{solar, C}] \end{aligned} \quad (6.54)$$

- Expresiones específicas

$$\begin{aligned} J_{PN\ ext} = & E_{PN\ ext} + \rho_{solar\ P\ ext} G_{solar, PN} + F_{PiCielo} (\rho_{P\ ext} \sigma T_{cielo}^4 \\ & + \rho_{solar\ P\ ext} G_{solar, d}) \\ & + F_{P1T} [\rho_{P\ ext} (\varepsilon_T \sigma T_{PN\ ext}^4 + \rho_T \sigma T_{cielo}^4) \\ & + \rho_{solar\ P\ ext} \rho_{solar\ T} G_{solar, C}] \end{aligned} \quad (6.55)$$

$$\begin{aligned} J_{PS\ ext} = & E_{Pi\ ext} + \rho_{solar\ P\ ext} G_{solar, PS} + F_{PiCielo} (\rho_{P\ ext} \sigma T_{cielo}^4 \\ & + \rho_{solar\ P\ ext} G_{solar, d}) \\ & + F_{P1T} [\rho_{P\ ext} (\varepsilon_T \sigma T_{PS\ ext}^4 + \rho_T \sigma T_{cielo}^4) \\ & + \rho_{solar\ P\ ext} \rho_{solar\ T} G_{solar, C}] \end{aligned} \quad (6.56)$$

$$\begin{aligned} J_{PE\ ext} = & E_{Pi\ ext} + \rho_{solar\ P\ ext} G_{solar, PE} + F_{PiCielo} (\rho_{P\ ext} \sigma T_{cielo}^4 \\ & + \rho_{solar\ P\ ext} G_{solar, d}) \\ & + F_{P2T} [\rho_{P\ ext} (\varepsilon_T \sigma T_{PE\ ext}^4 + \rho_T \sigma T_{cielo}^4) \\ & + \rho_{solar\ P\ ext} \rho_{solar\ T} G_{solar, C}] \end{aligned} \quad (6.57)$$

$$\begin{aligned} J_{PO\ ext} = & E_{Pi\ ext} + \rho_{solar\ P\ ext} G_{solar, PO} + F_{PiCielo} (\rho_{P\ ext} \sigma T_{cielo}^4 \\ & + \rho_{solar\ P\ ext} G_{solar, d}) \\ & + F_{P2T} [\rho_{P\ ext} (\varepsilon_T \sigma T_{PO\ ext}^4 + \rho_T \sigma T_{cielo}^4) \\ & + \rho_{solar\ P\ ext} \rho_{solar\ T} G_{solar, C}] \end{aligned} \quad (6.58)$$

Flujo de radiación neto: Sustituimos en la ecuación 6.7 cambiando el signo debido a que el calor entrante se considera positivo según el convenio establecido.

- Expresión general

$$q''_{rad\ Pi\ ext} = G_{Pi\ ext} - J_{Pi\ ext} \quad (6.59)$$

- Expresiones específicas

$$q''_{rad\ PN\ ext} = G_{PN\ ext} - J_{PN\ ext} \quad (6.60)$$

$$q''_{rad\ PS\ ext} = G_{PS\ ext} - J_{PS\ ext} \quad (6.61)$$

$$q''_{rad\ PE\ ext} = G_{PE\ ext} - J_{PE\ ext} \quad (6.62)$$

$$q''_{rad\ PO\ ext} = G_{PO\ ext} - J_{PO\ ext} \quad (6.63)$$

6.2.2. Radiación interior

El intercambio de radiación en el interior de la nave se produce entre todas las superficies, objetos (maquinaria, muebles ...) y personas. Como la radiación que producen los objetos y personas sobre las distintas superficies o entre ellas normalmente no adquiere valores muy significativos, son muy variables y además añaden gran complejidad al cálculo, se desconsiderarán su influencia en los cálculos. Por lo que solo se estudiará el intercambio de calor entre las superficies interiores de los cerramientos (cubierta, paredes y suelo). También cabe resaltar, que las fuentes de radiación serán las propias paredes, es decir, que la influencia de una posible incidencia de luz solar será descartada y la de la iluminación artificial será considerada como carga interna por lo que tampoco se tendrá en cuenta en estos cálculos.

En primer lugar, es importante conocer los factores de forma que determinarán el intercambio de calor entre las superficies. Para los factores de forma en el interior de la nave encontramos las dos situaciones vistas en el punto 6.1. *fundamentos teóricos*.

- Paredes paralelas y alineadas: Para los factores F_{CS} , F_{SC} , F_{P1P1} y F_{P2P2} se utilizarán las ecuaciones 6.12, 6.13 y 6.14.

Al considerar que la superficie de la cubierta y de la solera son iguales se puede deducir que $F_{CS} = F_{SC}$. Los parámetros característicos de las superficies para el cálculo de sus factores de forma necesarios son:

Cubierta: $X_{CS} = \text{Largo}$, $Y_{CS} = \text{Ancho}$ y $L_{CS} = \text{Alto}$ para F_{CS}

Pared tipo P1: $X_{P1P1} = \text{Ancho}$, $Y_{P1P1} = \text{Alto}$ y $L_{P1P1} = \text{Largo}$ para F_{P1P1}

Pared tipo P2: $X_{P2P2} = \text{Largo}$, $Y_{P2P2} = \text{Alto}$ y $L_{P2P2} = \text{Ancho}$ para F_{P2P2}

- Paredes perpendiculares con una orilla común: Para los factores F_{CP1} , F_{CP2} , F_{SP1} , F_{SP2} , F_{P1C} , F_{P1S} , F_{P1P2} , F_{P2C} , F_{P2S} y F_{P2P1} se utilizarán las ecuaciones 6.15, 6.16 y 6.17.

De nuevo, debido a la geometría se puede deducir que $F_{SP1} = F_{CP1}$, $F_{SP2} = F_{CP2}$, $F_{P1S} = F_{P1C}$ y $F_{P2S} = F_{P2C}$. Los parámetros característicos de las superficies para el cálculo de sus factores de forma necesarios son:

Cubierta:

$X_{CP1} = \text{Ancho}$, $Y_{CP1} = \text{Largo}$ y $Z_{CP1} = \text{Alto}$ para F_{CP1}

$X_{CP2} = \text{Largo}$, $Y_{CP2} = \text{Ancho}$ y $Z_{CP2} = \text{Alto}$ para F_{CP2}

Pared tipo P1:

$X_{P1C} = \text{Ancho}$, $Y_{P1C} = \text{Alto}$ y $Z_{P1C} = \text{Largo}$ para F_{P1C}

$X_{P1P2} = \text{Alto}$, $Y_{P1P2} = \text{Ancho}$ y $Z_{P1P2} = \text{Largo}$ para F_{P1P2}

Pared tipo P2:

$X_{P2C} = \text{Largo}$, $Y_{P2C} = \text{Alto}$ y $Z_{P2C} = \text{Ancho}$ para F_{P2C}

$X_{P2P1} = \text{Alto}$, $Y_{P2P1} = \text{Largo}$ y $Z_{P2P1} = \text{Ancho}$ para F_{P2P1}

Para el cálculo de los factores de forma se han utilizado los subíndices P1 y P2 para simplificar ya que dependen exclusivamente de la geometría. Se trata de un proceso laborioso donde se puede cometer errores fácilmente. Es recomendable usar la ecuación 6.11 para verificar su correcto desarrollo en todas las superficies.

Una vez obtenidos estos factores se puede proceder al cálculo de la irradiación en cada superficie interior.

Irradiación: Recurrir a la ecuación 6.19.

- Expresión general

$$G_{i \text{ int}} = \sum_j^N F_{ij} J_j \quad (6.64)$$

- Expresiones específicas

$$G_{C \text{ int}} = F_{CS} J_{S \text{ int}} + F_{CP1} J_{PN \text{ int}} + F_{CP1} J_{PS \text{ int}} + F_{CP2} J_{PE \text{ int}} + F_{CP2} J_{PO \text{ int}} \quad (6.65)$$

$$G_{S \text{ int}} = F_{SC} J_{C \text{ int}} + F_{SP1} J_{PN \text{ int}} + F_{SP1} J_{PS \text{ int}} + F_{SP2} J_{PE \text{ int}} + F_{SP2} J_{PO \text{ int}} \quad (6.66)$$

$$G_{PN \text{ int}} = F_{P1C} J_{C \text{ int}} + F_{P1S} J_{S \text{ int}} + F_{P1P1} J_{PS \text{ int}} + F_{P1P2} J_{PE \text{ int}} + F_{P1P2} J_{PO \text{ int}} \quad (6.67)$$

$$G_{PS\ int} = F_{P1C} J_{C\ int} + F_{P1S} J_{S\ int} + F_{P1P1} J_{PN\ int} + F_{P1P2} J_{PE\ int} + F_{P1P2} J_{PO\ int} \quad (6.68)$$

$$G_{PE\ int} = F_{P2C} J_{C\ int} + F_{P2S} J_{S\ int} + F_{P2P1} J_{PN\ int} + F_{P2P1} J_{PS\ int} + F_{P2P2} J_{PO\ int} \quad (6.69)$$

$$G_{PE\ int} = F_{P2C} J_{C\ int} + F_{P2S} J_{S\ int} + F_{P2P1} J_{PN\ int} + F_{P2P1} J_{PS\ int} + F_{P2P2} J_{PE\ int} \quad (6.70)$$

Potencia emisiva:

- Expresión general

$$E_{i\ int} = \varepsilon_{i\ int} \sigma T_{i\ int}^4 \quad (6.71)$$

- Expresiones específicas

$$E_{C\ int} = \varepsilon_{C\ int} \sigma T_{C\ int}^4 \quad (6.72)$$

$$E_{S\ int} = \varepsilon_{S\ int} \sigma T_{S\ int}^4 \quad (6.73)$$

$$E_{PN\ int} = \varepsilon_{P\ int} \sigma T_{PN\ int}^4 \quad (6.74)$$

$$E_{PS\ int} = \varepsilon_{P\ int} \sigma T_{PS\ int}^4 \quad (6.75)$$

$$E_{PE\ int} = \varepsilon_{P\ int} \sigma T_{PE\ int}^4 \quad (6.76)$$

$$E_{PO\ int} = \varepsilon_{P\ int} \sigma T_{PO\ int}^4 \quad (6.77)$$

Radiosidad:

- Expresión general

$$J_{i\ int} = E_{i\ int} + \rho_{i\ int} G_{i\ int} \quad (6.78)$$

- Expresiones específicas

$$J_{C\ int} = E_{C\ int} + \rho_{C\ int} G_{C\ int} \quad (6.79)$$

$$J_{S \text{ int}} = E_{S \text{ int}} + \rho_{S \text{ int}} G_{S \text{ int}} \quad (6.80)$$

$$J_{PN \text{ int}} = E_{PN \text{ int}} + \rho_{P \text{ int}} G_{PN \text{ int}} \quad (6.81)$$

$$J_{PS \text{ int}} = E_{PS \text{ int}} + \rho_{P \text{ int}} G_{PS \text{ int}} \quad (6.82)$$

$$J_{PE \text{ int}} = E_{PE \text{ int}} + \rho_{P \text{ int}} G_{PE \text{ int}} \quad (6.83)$$

$$J_{PO \text{ int}} = E_{PO \text{ int}} + \rho_{P \text{ int}} G_{PO \text{ int}} \quad (6.84)$$

Flujo de radiación neto: Sustituyendo en la *ecuación 6.7*, esta vez el flujo de calor será positivo la radiación saliente de la superficie.

- Expresión general

$$q''_{rad \ i \text{ int}} = J_{i \text{ int}} - G_{i \text{ int}} \quad (6.85)$$

- Expresiones específicas

$$q''_{rad \ C \text{ int}} = J_{C \text{ int}} - G_{C \text{ int}} \quad (6.86)$$

$$q''_{rad \ S \text{ int}} = J_{S \text{ int}} - G_{S \text{ int}} \quad (6.87)$$

$$q''_{rad \ PN \text{ int}} = J_{PN \text{ int}} - G_{PN \text{ int}} \quad (6.88)$$

$$q''_{rad \ PS \text{ int}} = J_{PS \text{ int}} - G_{PS \text{ int}} \quad (6.89)$$

$$q''_{rad \ PE \text{ int}} = J_{PE \text{ int}} - G_{PE \text{ int}} \quad (6.90)$$

$$q''_{rad \ PO \text{ int}} = J_{PO \text{ int}} - G_{PO \text{ int}} \quad (6.91)$$

7. BALANCE TÉRMICO

En este capítulo veremos los diferentes balances térmicos que harán que todo lo visto hasta ahora converja en un sistema compatible determinado o, dicho de otra manera, en un sistema de ecuaciones resoluble. Para ello, primero deberemos aclarar los principios teóricos que construirán estas expresiones matemáticas.

7.1. Fundamentos teóricos

Un balance térmico se define como la aplicación de la *primera ley de la termodinámica* (o *ley de conservación de la energía*) a un volumen de control bajo condiciones de volumen y presión constantes (procesos isobaros e isocoros donde no hay trabajo) y se considera exclusivamente la energía calorífica. Este tipo de balance tiene una aplicación muy importante en el diseño de edificios, sobretodo en la parte del acondicionamiento y climatización. Lo primero que se necesita es concretar un volumen de control donde podamos determinar la entrada o salida de energía a través de sus superficies. También es necesario saber cuánta energía térmica se genera en el interior a causa de la transformación de otras formas de energía (eléctrica, química, nuclear o electromagnética). El balance de la energía saliente, entrante y generada determinarán la energía almacenada en el volumen de control. Tras realizar el balance se pueden obtener tres resultados distintos: que la energía almacenada aumente (signo positivo), que disminuya (signo negativo) o que sea igual a cero. Este último resultado se encuentra cuando la energía saliente contrarresta por completo la energía entrante y generada. Mientras estas condiciones perduren en el tiempo prevalecerá la condición de estado estable.

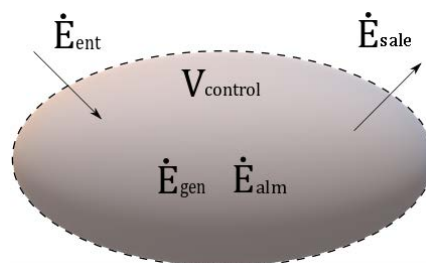


Figura 7.1: Conservación de la energía en un volumen de control.

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_{gen} - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm} \quad (7.1)$$

Esta ley debe satisfacerse en todos los instantes de tiempo t . De la misma manera debe suceder para cualquier intervalo de tiempo Δt . En este intervalo se compara la cantidad de energía (J) que entra o se genera respecto a la cantidad de energía que sale desde el principio hasta el final del intervalo (base de cálculo horaria), con la finalidad de determinar la cantidad de energía almacenada dentro del volumen de control. Una vez definido el intervalo podemos expresar la *ecuación 7.1* como

$$E_{ent} + E_{gen} - E_{sale} = \Delta E_{alm} \quad (7.2)$$

La energía se almacenada en el volumen de control mediante cambios de energía interna, potencial y cinética. A su vez la energía interna tiene una componente sensible y otra latente. Los cambios de energía potencial y cinética corresponden a efectos químicos y nucleares, respectivamente, que no trataremos en este trabajo ya que son casos poco comunes. Además, se pueden incluir en el término de energía generada ya que se comportan como fuentes térmicas. La cantidad de energía almacenada es entonces igual al incremento de energía interna en el volumen de control.

$$\Delta E_{alm} = \Delta U = \Delta U_{sensible} + \Delta U_{latente} \quad (7.3)$$

La energía latente aparece siempre que existe un cambio de estado en la materia. En edificación generalmente podemos encontrar evaporaciones y condensaciones de agua en algunas superficies que se encuentren en el interior y dentro de algunos materiales porosos que forman el edificio. Esta agua proviene de la humedad en el aire ambiente interior y exterior. El calor se acumula como energía latente cuando hay evaporación y el calor almacenado disminuye cuando se da el proceso contrario, es decir, cuando hay condensación. Sin embargo, estos cambios de estado no son significantes a menos que no estemos tratando con edificios con grandes cantidades de agua en piscinas o depósitos abiertos. Otra fuente de energía latente, además de fuente de calor sensible, son las personas que se encuentran en el edificio. Estas aportaciones se producen de manera constante en cada individuo y se representan como una carga de energía latente. En caso de que la humedad absoluta del exterior y del interior sean diferentes, obtendremos que la ventilación del edificio también representará una carga latente (positiva o negativa).

La energía sensible será la componente encargada de aumentar o disminuir la temperatura del material dentro del volumen de control. En un entorno isocoro e isobaro, donde la variación de energía interna es igual al calor, y se considera nulo el cambio en energía latente, se puede expresar la variación de energía sensible en forma de ecuación como

$$\dot{E}_{alm} = \frac{dU_{sensible}}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho V c T) \quad (7.4)$$

Si además se considera para un intervalo de tiempo Δt y asumimos que las variaciones de temperatura son suficientemente pequeñas como para considerar que las propiedades del material del volumen de control son constantes, la ecuación 7.4 se reduce a

$$\Delta E_{alm} = \Delta U_{sensible} = \rho V c \Delta T \quad (7.5)$$

Donde $\Delta T = T_{final} - T_{inicial}$.

7.2. Descripción práctica

7.2.1. Calor almacenado

Para calcular el calor almacenado en los distintos volúmenes de control que veremos más adelante recurriremos a la ecuación 7.5. Por tanto, se asume lo siguiente:

- Se ignora la acumulación en energía latente, potencial y cinética:
Se considerarán insignificantes las evaporaciones y condensaciones en el interior de la nave y no se considerará la aportación de energía latente por ocupación o ventilación por lo que no afectará en el balance térmico a la energía acumulada ($\Delta Q_{alm} = \Delta U_{sensible}$).
- Propiedades de los materiales constantes:
Se asumirá que las variaciones de temperatura son suficientemente pequeñas para asumir que las propiedades de los diversos materiales y medios son constantes. También despreciaremos la transformación de calor en efectos de dilatación y contracción.
- Volumen de control isocoro e isobaro:
Estas son las condiciones normales bajo las que se encuentra una edificación. El aumento de energía interna mediante la entrada o salida de trabajo se descartará por completo.
- Para un intervalo Δt :
Este intervalo durará una hora, donde $\Delta T = T_i(t) - T_i(t - 1)$. Se calculará el calor acumulado en ese periodo de tiempo, donde partimos desde las temperaturas calculadas en el periodo anterior ($t - 1$) hasta las temperaturas resultantes en el instante actual t .

Se estimará la temperatura de los materiales de los cerramientos como la media entre la temperatura de la superficie exterior e interior.

- Expresión general

$$T_i = \frac{T_{i\ ext} + T_{i\ int}}{2} \quad (7.6)$$

- Expresiones específicas

$$T_C = \frac{T_{C\ ext} + T_{C\ int}}{2} \quad (7.7)$$

$$T_{PN} = \frac{T_{PN\ ext} + T_{PN\ int}}{2} \quad (7.8)$$

$$T_{PS} = \frac{T_{PS\ ext} + T_{PS\ int}}{2} \quad (7.9)$$

$$T_{PE} = \frac{T_{PE\ ext} + T_{PE\ int}}{2} \quad (7.10)$$

$$T_{PO} = \frac{T_{PO\ ext} + T_{PO\ int}}{2} \quad (7.11)$$

La acumulación de calor se establece para todos los cerramientos, cubierta, paredes y solera. También definiremos la acumulación de calor para el aire ambiente interior, el cual se considerará que tiene una temperatura homogénea por todo su volumen (T_{amb}). Esta es una simplificación no se adapta estrictamente a la realidad ya que no tiene en cuenta los gradientes de temperatura que se forman, sobre todo con la altura. Sin embargo, nos dará una estimación de la temperatura media del aire interior, la cual a nivel de suelo se suele reducir. Cuanto mayor altura tenga la nave más se reducirá esta temperatura ambiente media a nivel de suelo. Por otro lado, existen aparatos de ventilación industrial para romper esta estratificación del aire en el interior de la nave, los cuales homogenizan la temperatura del aire por toda la nave, por lo que se puede considerar como este caso de estudio.

- Expresión general

$$Q_{alm\ i}(t) = \rho_i V_i c_i [T_i(t) - T_i(t-1)] \quad (7.12)$$

- Expresiones específicas

$$Q_{alm\ c}(t) = \rho_c V_c c_c [T_c(t) - T_c(t-1)] \quad (7.13)$$

$$Q_{alm\ s}(t) = \rho_s V_s c_s [T_s(t) - T_s(t-1)] \quad (7.14)$$

$$Q_{alm\ PN}(t) = \rho_P V_{P1} c_P [T_{PN}(t) - T_{PN}(t-1)] \quad (7.15)$$

$$Q_{alm\ PS}(t) = \rho_P V_{P1} c_P [T_{PS}(t) - T_{PN}(t-1)] \quad (7.16)$$

$$Q_{alm\ PE}(t) = \rho_P V_{P2} c_P [T_{PE}(t) - T_{PE}(t-1)] \quad (7.17)$$

$$Q_{alm\ PO}(t) = \rho_P V_{P2} c_P [T_{PO}(t) - T_{PO}(t-1)] \quad (7.18)$$

$$Q_{alm\ amb}(t) = \rho_{air} V_{air} c_{p\ air} [T_{amb}(t) - T_{amb}(t-1)] \quad (7.19)$$

Como hemos visto, el incremento de calor se toma respecto al periodo anterior. Esto quiere decir que se necesita inicializar las variables de las temperaturas del periodo anterior al primer periodo de cálculo. De la inicialización del modelo de cálculo se hablará algo más adelante en *Tiempo de calentamiento*.

El volumen del suelo V_S es un concepto un tanto complejo de definir, pues no hay una zona concreta donde el calor se acumule en el terreno. Además, este concepto no incluye tan solo el terreno sino también todos los objetos (maquinaria, herramientas, mobiliario, etc.) que se encuentren en el interior de la nave almacenan energía. Con el fin de establecer un equivalente a todos los cuerpos que podamos encontrar, se asumirá que tienen una densidad, calor específico y temperatura similar a la del suelo. Este almacenamiento de calor es un concepto que no se puede obviar porque cobra un papel muy importante en el balance térmico de un edificio. Para este trabajo se ha decidido definir dicho volumen como viene en la *ecuación 7.20*.

$$V_S = A_S \cdot L_S \quad (7.20)$$

Donde L_S representa una longitud que permita poder simular la acumulación de calor del suelo y de los objetos del interior de la nave.

Para estudiar que valores puede tomar L_S , hay que analizar previamente que representa la acumulación de calor en el suelo. La generación de calor en el núcleo de la tierra, la radiación solar y su entorno superficial, son los encargados de aportar calor al terreno. Sin embargo, al encontrarnos debajo de una nave no hay incidencia solar directa sobre el terreno y la influencia del interior del edificio es muy baja. Además, al tratarse de circunstancias superficiales variables obtenemos que a mayor profundidad menor será su aportación al terreno. Por otro lado, la generación de calor en el núcleo de la tierra se puede considerar constante, que es quien mayor influencia tiene sobre el terreno. Si a todo esto le añadimos que la masa térmica del terreno se puede considerar infinita, se puede concluir que la temperatura del terreno en función de la profundidad es prácticamente constante a lo largo de un periodo anual. Por lo tanto, L_S tiene que ser tal que permita almacenar y dar calor al interior de la nave pero con una inercia térmica suficiente que mantenga estable a la temperatura del suelo. Para este trabajo se va a considerar que la temperatura de suelo en un “día proyecto” es función del régimen que se encuentre en cada caso. Para el régimen de verano se ha establecido que la temperatura del suelo sea 19 °C mientras que para invierno esta disminuye hasta 10 °C. Normalmente, como se desconoce la temperatura exacta del suelo, se recurre a las medias anuales de la temperatura exterior o a la temperatura del agua de red (tuberías enterradas) que dan valores aproximados a los considerados en este trabajo. Gracias al desarrollo del modelo en el software EES se ha demostrado que la longitud a partir de la cual se mantiene la temperatura de suelo constante para cualquier dimensión de nave es para $L_S > 10 \text{ m}$. Este límite lo impone las naves con menor superficie de solera.

Tiempo de calentamiento

Se trata del tiempo necesario para que las variables se estabilicen en un régimen y rango de funcionamiento estable. Lo primero de todo, como ya adelantábamos previamente es necesario inicializar las variables que lo requieran. Se trata de las temperaturas medias de los cerramientos y de la temperatura ambiente interior. Para inicializarlas, se ha decidido establecer el dato de la temperatura exterior como la temperatura de todos los cerramientos y aire ambiente interior en $t = 1 h$. Por consiguiente, se ha determinado como punto de inicio de cálculo el instante $t = 2 h$.

$$T_{amb}(1) = T_{ext}(1)$$

$$T_C(1) = T_{ext}(1)$$

$$T_{PN}(1) = T_{ext}(1)$$

$$T_{PS}(1) = T_{ext}(1)$$

$$T_{PE}(1) = T_{ext}(1)$$

$$T_{PO}(1) = T_{ext}(1)$$

La temperatura del suelo se inicializa en los valores comentados previamente.

- Si *régimen = verano*

$$T_S(1) = 19^{\circ}\text{C}$$

- Si *régimen = invierno*

$$T_S(1) = 10^{\circ}\text{C}$$

Una vez el sistema de cálculo ya es resoluble para el primer instante, se inicia el tiempo de calentamiento donde se comienza a resolver el sistema para cada t , hasta que se alcance $t = 24h$. A partir de ese instante se inician los cálculos del “día proyecto” (resultados finales y mostrados) donde se vuelve a calcular de nuevo un día entero, pero esta vez con una estabilidad del sistema adecuada. Se ha decidido un periodo tan amplio de calentamiento para ajustarse todo lo posible al desarrollo real del sistema. Esto podría afectar al entorno de programación donde apliquemos el modelo debido a que dobla las ecuaciones, y por lo tanto la carga de cálculo. En este caso el software EES donde se aplicará el modelo, tiene un límite de 6000 ecuaciones, debido a que se calculan dos días el número de ecuaciones a resolver se dobla (48h por el número total de variables), que resulta en aproximadamente 5000 ecuaciones. Por lo tanto, en este entorno de programación será factible la aplicación del modelo con el tiempo de calentamiento, pero en caso de querer añadir más variables nos pone un límite de 1000 ecuaciones más.

7.2.2. Balances térmicos en los cerramientos

La energía entrante o saliente de la nave depende de la transmisión de calor por los cerramientos. Por lo que se estudiarán los balances de energía en cada uno de ellos.

Para determinar el intervalo de estudio, recordemos una vez más, que todas las variables aplicadas hasta ahora son función del tiempo, y que los datos meteorológicos que hemos ido usando son datos horarios. Por lo que el intervalo de tiempo Δt que se aplicará para todos los balances equivaldrá a una hora.

$$\Delta t = 3600 \text{ s}$$

Los límites del volumen de control para cada uno de los cerramientos serán sus superficies interiores, exteriores y contiguas de los demás cerramientos. Al tratarse de una transmisión de calor asumida como unidireccional (además de homogénea por toda la superficie) las entradas y salidas de energía se estudiarán en los límites de las superficies interiores y exteriores de cada cerramiento. Recordemos que despreciábamos la transferencia de calor a través de las equinas entre cerramientos. En primer instante la existencia de generación de energía será descartada para los cerramientos. Respecto a la cantidad de energía entrante y saliente se considerará según el convenio de signos utilizado, es decir, toda energía entrante a la nave será positiva. Por lo tanto, la transmisión de calor por convección y radiación exterior será energía entrante, mientras que la interior será energía saliente del volumen de control.

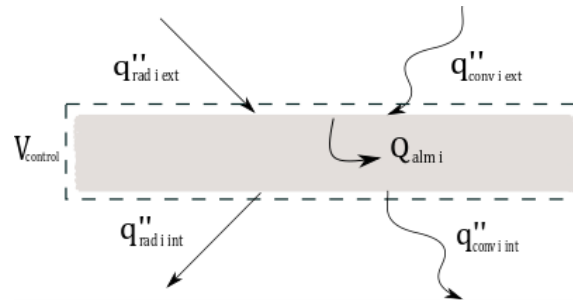


Figura 7.2: Conservación de la energía para un cerramiento.

$$\Delta t A_i (q''_{conv i ext} + q''_{rad i ext} - q''_{conv i int} - q''_{rad i int}) = Q_{alm i} \quad (7.21)$$

Sin embargo, como se puede ver en la *figura 7.3* se ha dividido el volumen de control descrito en dos volúmenes de control adyacentes. Esto se debe a la consideración de las ecuaciones de conducción de calor que no tenían cabida en el balance anterior. Por lo que el balance térmico también se divide en dos ecuaciones. El volumen de control de la superficie exterior se fija cubriendo la mayor parte del material del cerramiento. Por otro lado, el volumen de control de la superficie interior solo incluye su respectiva superficie de forma infinitesimal. Esto deriva a que la acumulación de calor solo será viable para el volumen de control descrito en primer instante, el que incluye la superficie exterior. La conducción de calor a través del cerramiento se considera como energía saliente y entrante para el volumen de control de la superficie exterior e interior respectivamente.

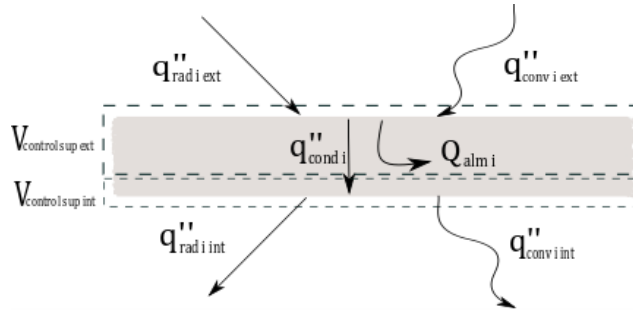


Figura 7.3: Conservación de la energía para un cerramiento mediante el uso de dos volúmenes de control adyacentes.

▪ Expresión general

$$\Delta t A_i (q''_{conv i ext} + q''_{rad i ext} - q''_{cond i}) = Q_{alm i} \quad (7.22)$$

$$q''_{cond i} - q''_{conv i int} - q''_{rad i int} = 0 \quad (7.23)$$

▪ Expresiones específicas

$$\Delta t A_C (q''_{conv C ext} + q''_{rad C ext} - q''_{cond C}) = Q_{alm C} \quad (7.24)$$

$$q''_{cond C} - q''_{conv C int} - q''_{rad C int} = 0 \quad (7.25)$$

$$\Delta t A_{PN} (q''_{conv PN ext} + q''_{rad PN ext} - q''_{cond PN}) = Q_{alm PN} \quad (7.26)$$

$$q''_{cond PN} - q''_{conv PN int} - q''_{rad PN int} = 0 \quad (7.27)$$

$$\Delta t A_{PS} (q''_{conv PS ext} + q''_{rad PS ext} - q''_{cond PS}) = Q_{alm PS} \quad (7.28)$$

$$q''_{cond PS} - q''_{conv PS int} - q''_{rad PS int} = 0 \quad (7.29)$$

$$\Delta t A_{PE} (q''_{conv PE ext} + q''_{rad PE ext} - q''_{cond PE}) = Q_{alm PE} \quad (7.30)$$

$$q''_{cond PE} - q''_{conv PE int} - q''_{rad PE int} = 0 \quad (7.31)$$

$$\Delta t A_{PO} (q''_{conv PO ext} + q''_{rad PO ext} - q''_{cond PO}) = Q_{alm PO} \quad (7.32)$$

$$q''_{cond PO} - q''_{conv PO int} - q''_{rad PO int} = 0 \quad (7.33)$$

Al análisis para el cerramiento del suelo es algo distinto debido a las variables que lo determinan. Recordemos que transferencia de calor q''_S indica la cantidad de energía que se intercambia con el exterior a través del cerramiento del suelo. Después también encontramos un flujo de radiación hacia los demás cerramientos y una convección hacia el aire ambiente. Por último, tenemos el almacenamiento de calor en el suelo y en los objetos del interior de la nave. La conducción q''_S al solo depender de la temperatura interior y exterior se considerará independiente del flujo de energía superficial de este cerramiento. Por lo que finalmente llegamos a la ecuación 7.34.

$$\Delta t A_S (-q''_{conv S int} - q''_{rad S int}) = Q_{alm S} \quad (7.34)$$

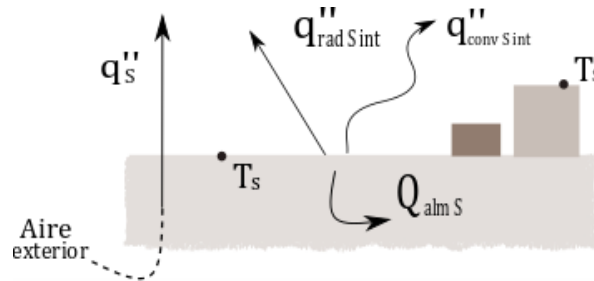


Figura 7.4: Flujo de calor para el cerramiento del suelo.

7.2.3. Balance térmico global

El balance térmico global es donde se encuentran todos los balances hasta ahora vistos, gracias a que todos ellos confluyen e intercambian calor con el aire interior de la nave. Su volumen de control está limitado por las superficies interiores de los cerramientos, las cuales se encuentran excluidas del volumen y actuaran como límite exterior. Esto se debe a que se desprecian los efectos de la radiación sobre el aire ambiente, considerándose la transmisión de calor por radiación exclusivamente entre superficies para este trabajo. Por lo tanto, el flujo de calor entrante por los cerramientos al volumen de control será únicamente por convección ($q''_{conv i int}$).

Antes de concluir con el balance global deberemos analizar otras aportaciones de calor producidas idealmente en el interior del volumen de control. Estas son la carga de ventilación y las cargas internas. La cantidad de calor que se transfiere en una hora al aire interior a través de la ventilación es

$$Q_{vent} = rev \rho_{air} V_{air} c_{p air} [T_{amb} - T_{ext}] \quad (7.35)$$

Se ha establecido que el signo de la ecuación 7.35 sea positivo cuando el aire interior este a más temperatura que el aire exterior. Por otro lado, la carga interna total será la suma

de todas las cargas internas que hayamos especificado en las variables de entrada. Se asumirá que la aportación de estas cargas esta homogéneamente repartida en el volumen de control.

$$q_{CI} = q_{ocup} + q_{ilum\ tot} + q_{elec} + q_{maq} + q_{otros} \quad (7.36)$$

Finalmente, como ya adelantábamos, la *ecuación 7.37* representa el balance global que relaciona todas las cargas vistas hasta ahora. El análisis de las variables sigue siendo de forma horaria por lo que el intervalo de tiempo usado será el mismo que anteriormente ($\Delta t = 3600\ s$).

$$\begin{aligned} \frac{Q_{alm\ amb} + Q_{vent}}{\Delta t} = & q_{CI} + A_c q''_{conv\ C\ int} + A_s (q''_{conv\ S\ int} + q''_S) \\ & + A_{P1} (q''_{conv\ PN\ int} + q''_{conv\ PS\ int}) + A_{P2} (q''_{conv\ PE\ int} + q''_{conv\ PO\ int}) \end{aligned} \quad (7.37)$$

8. VARIABLES DE SALIDA Y CASO PRÁCTICO

8.1. Variables de salida

Una vez se han explicitado todas las ecuaciones del modelo de cálculo, el sistema a resolver será compatible determinado. Por lo que si lo resolvemos obtendremos una solución horaria para cada variable, recordemos que habrá un valor para cada hora del “día proyecto” (24h, 24 soluciones). Al tener tantas variables de salida, como los tipos de flujo de calor entrantes y salientes, es imprescindible saber cuáles son las variables de mayor interés. La temperatura ambiente media (T_{amb}) es sin duda la más representativa de todos los resultados, ya que refleja el calor que va entrando y saliendo de la nave.

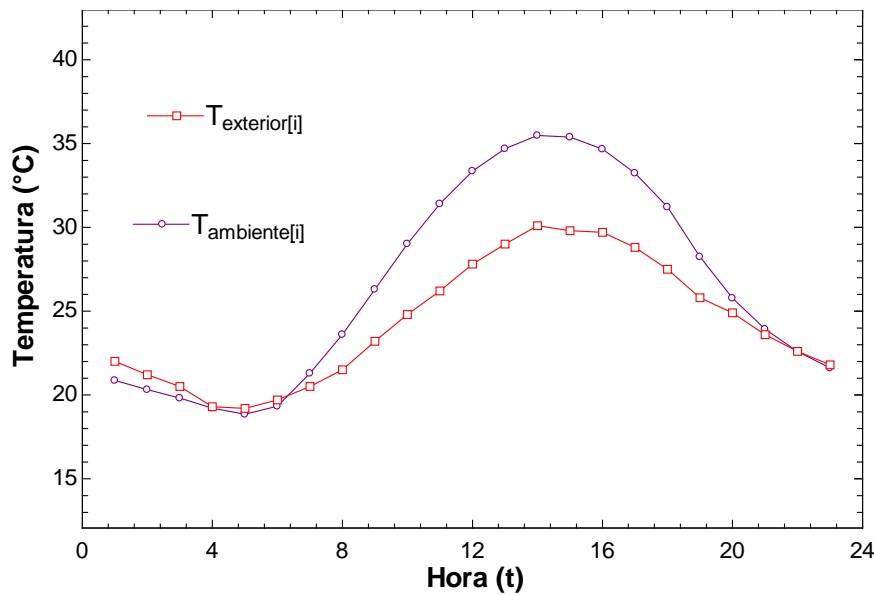


Figura 8.1: Desarrollo de la temperatura exterior y de la temperatura ambiente media del interior de la nave.

De esta variable horaria se pueden extraer el máximo y mínimo absoluto que indicaran el rango en el que variará dicha temperatura a lo largo del día.

$$T_{max abs} = MAX[T_{amb}(1..24)] \quad (8.1)$$

$$T_{min abs} = MIN[T_{amb}(1..24)] \quad (8.2)$$

También se puede establecer un máximo, un mínimo y una media relativa a las horas laborables, es decir, que temperatura máxima, mínima y media se alcanzarán durante el periodo en el que haya trabajadores dentro de la nave.

$$T_{max rel} = MAX[T_{amb}(Hora_{inicio}..Hora_{fin})] \quad (8.3)$$

$$T_{med\ rel} = \frac{\sum_{Hora_{inicio}}^{Hora_{fin}} T_{amb}(t)}{Hora_{fin} - Hora_{inicio}} \quad (8.4)$$

$$T_{min\ rel} = MIN[T_{amb}(Hora_{inicio}..Hora_{fin})] \quad (8.5)$$

Otros datos de interés que ya adelantábamos en el principio de la memoria, son los cálculos de la potencia y consumo diario mínimos de los equipos de climatización. El desarrollo de la temperatura ambiente (sin climatizar) se puede comparar a la temperatura de consigna T_{AC} de forma horaria durante el periodo laborable (periodo establecido para el funcionamiento de los equipos de climatización). Es decir, comparamos la temperatura que obtenemos sin y con equipos de climatización. Esta diferencia de temperatura marcará el calor mínimo que tendrá que aportar la máquina. Se considera calor mínimo debido a que sí se conservase la temperatura de consigna en el interior de la nave, la transmisión de calor por convección en el interior aumentaría al aumentar la diferencia de temperatura respecto a las superficies interiores. Por consiguiente, los equipos de climatización deberán desarrollar mayor potencia y, por lo tanto, mayor consumo diario de la que se muestra en este trabajo.

Refrigeración

Si analizamos esta diferencia de temperaturas para un caso de condiciones aleatorias en régimen de verano obtenemos que ese calor es proporcional al área encerrada en la superficie azul de la *figura 8.2*. Si transformamos esta diferencia de temperaturas en una función equivalente que sea por igual función del tiempo ($f(t) = dT(t)$) se puede deducir que el consumo horario en un “día proyecto” es

$$Q_{AC} = \rho_{air} V_{air} c_{p\ air} \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (8.6)$$

Recordemos que las propiedades del aire se encuentran fuera de la integral debido a la hipótesis de que son constantes para las circunstancias de este trabajo.

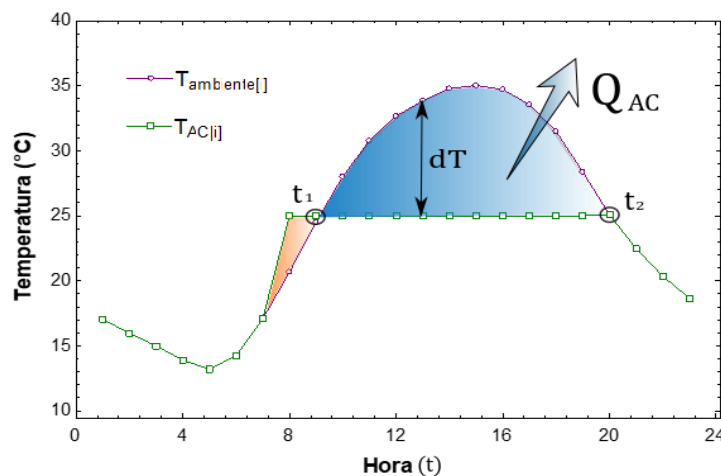


Figura 8.2: Intercambio de calor necesario para trasladar la temperatura ambiente a la temperatura de consigna (proceso de refrigeración).

Donde t_1 y t_2 representan el tiempo a la que la temperatura ambiente es mayor y menor que la de consigna respectivamente (periodo de climatización). El tiempo t_1 equivale para la *figura 8.2* al momento en el que empieza el área azul y t_2 al momento en el que se acaba. El área naranja representada en la *figura 8.2* representa el periodo donde la temperatura interior está a menor temperatura que la de consigna, que en régimen de verano será un periodo beneficioso para el sistema.

Si sustituimos en la *ecuación 8.6* los intervalos horarios con los que estamos trabajando obtenemos

$$Q_{AC} = \rho_{air} V_{air} c_{p\ air} \sum_{t=t_1}^{t_2} dT(t) \quad (8.7)$$

Antes de aplicar *ecuación 8.6* al cálculo del consumo mínimo diario en refrigeración se deben añadir unos factores que no se ha tenido en cuenta hasta ahora, pero que son imprescindibles para el cálculo de equipos de refrigeración.

La carga de energía latente producida por las personas y la ventilación es contrarrestada en verano por los equipos de refrigeración (en régimen de invierno es la ventilación quien se encarga de contrarrestarlas) por lo tanto deberá tenerse en cuenta a la hora del cálculo del consumo.

La carga latente que representa la ocupación se puede estimar mediante la *ecuación 8.8*.

➤ Si $Hora_{inicio} \leq Hora(t) < Hora_{fin}$

$$q_{ocup\ latente}(t) = [1 - f(T_{amb}, t)] \cdot q_{pers}(Tipo\ de\ trabajo) \cdot n_{pers} \quad (8.8)$$

Por otro lado, la carga latente que representa la ventilación se puede estimar mediante la *ecuación 8.9*.

$$Q_{vent\ latente}(t) = rev\ \rho_{air} V_{air} h_{fg\ air} [w_{ext}(t) - w_{amb}] \quad (8.9)$$

Donde $w_{ext}(t)$ representa la humedad absoluta en el exterior que es un dato horario de [3] y w_{amb} es la humedad absoluta del interior en caso de que estuviera climatizado, para unas condiciones de humedad relativa del 38% (dentro del rango que estipula el RITE [30, pp 114]) y temperatura igual a la de consigna. Este último valor se obtendrá de forma directa en el entorno EES mediante las propiedades termofísicas que contiene para el aire con agua (para una presión de una atmósfera).

Por último, el número de renovaciones que tenga la nave influirá directamente en la carga que tendrán que amortiguar los equipos de climatización. Esto se debe a que la carga de climatización depende del volumen de aire en el interior de la nave, al ser renovado, es como si fuera necesario climatizarlo de nuevo. Por lo tanto, el calor será función del número de renovaciones de la nave.

Una vez aclarados estos factores se puede definir el consumo diario mínimo que producirá la refrigeración de la nave (ecuación 8.10).

➤ Si $Hora_{inicio} \leq Hora(t) < Hora_{fin}$ y $T_{amb}(t) > T_{AC}$

$$q_{refri}(t) = \frac{(1 + rev)\rho_{air}V_{air}c_{p\ air}[T_{amb}(t) - T_{AC}]}{1000\ \Delta t} + \frac{q_{ocup\ latente}(t)}{1000} + \frac{Q_{vent\ latente}(t)}{1000\ \Delta t} \quad (8.10)$$

$$Q_{consumo\ refri} = \sum q_{refri}(t) \quad (8.11)$$

La razón de que se divida entre $1000\ \Delta t$ y 1000 es para pasar el consumo $q_{refri}(t)$ a kW . Por lo tanto, cuando se aplica el sumatorio de $q_{refri}(t)$ se obtiene el consumo diario $Q_{consumo\ refri}$ en kWh , que son las unidades normales para equipos de climatización en naves ($\Delta t = 3600$).

De forma análoga se calculará la potencia mínima del equipo de refrigeración, solo que esta vez hay que situarse en las dos horas del día más desfavorables, es decir, en las que la carga $q_{refri}(t)$ sea máxima (normalmente se trata de las 15 y 16h).

$$q_{maq\ refri} = \frac{MAX[q_{refri}(t) + q_{refri}(t + 1)]}{2} \quad (8.12)$$

Esta vez las unidades de la potencia $q_{maq\ refri}$ serán en kW .

Calefacción

El análisis en régimen de invierno del consumo y la potencia de los equipos de calefacción se basa en los mismos conceptos que la refrigeración. La diferencia radica en que la temperatura se invierte (la temperatura ambiente será menor a la de consigna) y en que el calor latente no representa ningún tipo de carga para los equipos de calefacción. Si elegimos de nuevo unas circunstancias aleatorias para el régimen de invierno, el consumo diario mínimo equivale la superficie naranja de la *figura 8.3*, pero esta vez el límite superior vendrá establecido por la temperatura de consigna en vez de por la temperatura ambiente.

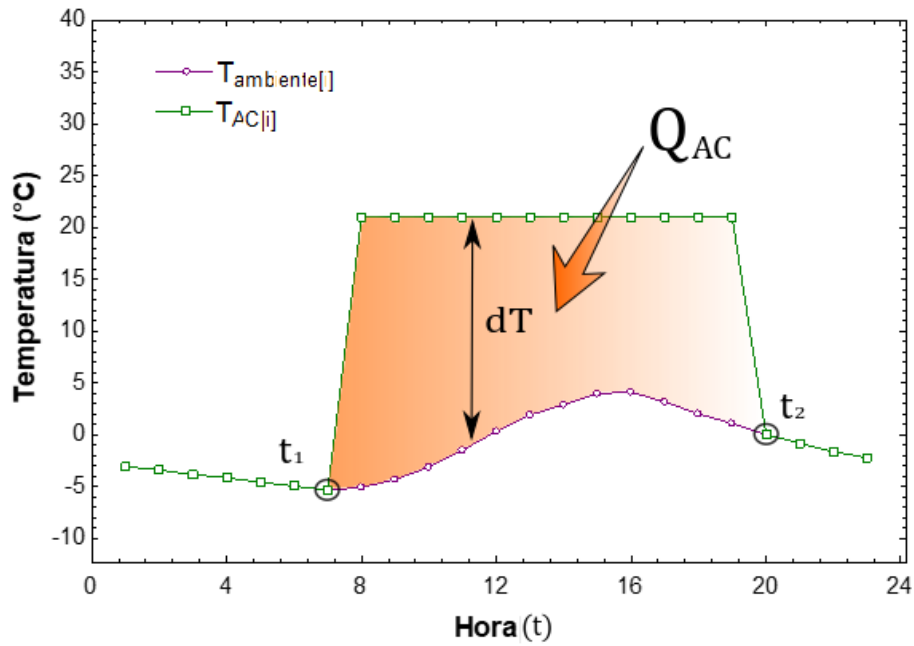


Figura 8.3: Intercambio de calor necesario para elevar la temperatura ambiente a la temperatura de consigna (proceso de calefacción).

Se puede observar que en régimen de invierno t_1 y t_2 coinciden con el inicio y final del periodo de funcionamiento o periodo laborable, por lo que la temperatura ambiente normalmente se encontrará por debajo de la de consigna.

➤ Si $Hora_{inicio} \leq Hora(t) < Hora_{fin}$ y $T_{amb}(t) < T_{AC}$

$$q_{calef}(t) = \frac{(1 + rev)\rho_{air}V_{air}c_{p\ air} [T_{AC}(t) - T_{amb}(t)]}{1000 \Delta t} \quad (8.13)$$

$$Q_{consumo\ calef} = \sum q_{calef}(t) \quad (8.14)$$

Para obtener la potencia del equipo de calefacción, se buscan de nuevo las horas más desfavorables, que se trata de las dos horas consecutivas que representen la mayor carga (normalmente se trata de las primeras horas de la mañana).

$$q_{maq\ calef} = \frac{MAX[q_{calef}(t) + q_{calef}(t + 1)]}{2} \quad (8.15)$$

Gráficos

Gracias a los gráficos, se puede conocer el comportamiento de una o varias variables de manera rápida e intuitiva. Como ya se vio en la *figura 8.1* la temperatura ambiente media es quizás uno de los más representante de los resultados, pero podemos encontrar otros gráficos de interés. Para poder explicarlos se ha utilizado el programa realizado en EES con los datos que vienen por defecto (estos valores se mostrarán en el punto 8.2. *Funcionamiento básico del archivo ejecutable*).

- Consumo del equipo de climatización: Muestra el consumo necesario (durante las horas laborables) para alcanzar la temperatura de consigna.

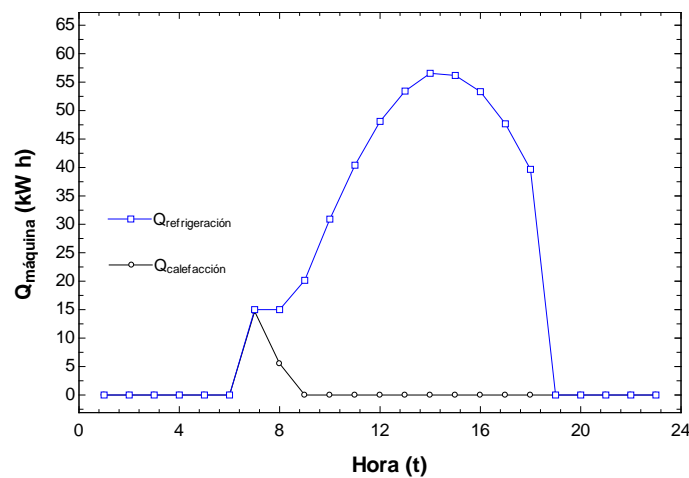


Figura 8.4: Consumo del equipo de climatización.

- Temperatura de climatización: Muestra la diferencia de temperaturas entre la de consigna y la ambiente.

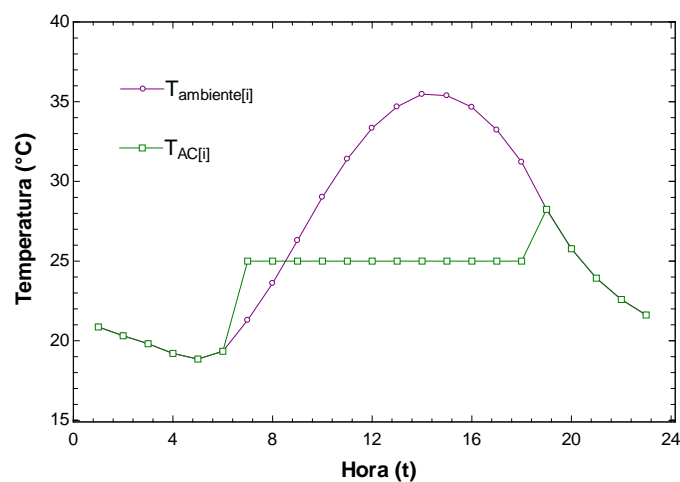


Figura 8.5: Comparación de la temperatura de consigna y la temperatura ambiente.

- Conducción de los cerramientos: Muestra la transferencia de calor por conducción en cada cerramiento y por consiguiente que pared esta mejor y peor aislada. Recordemos que según el convenio de signos la transferencia de calor entrante es positiva y saliente negativa.

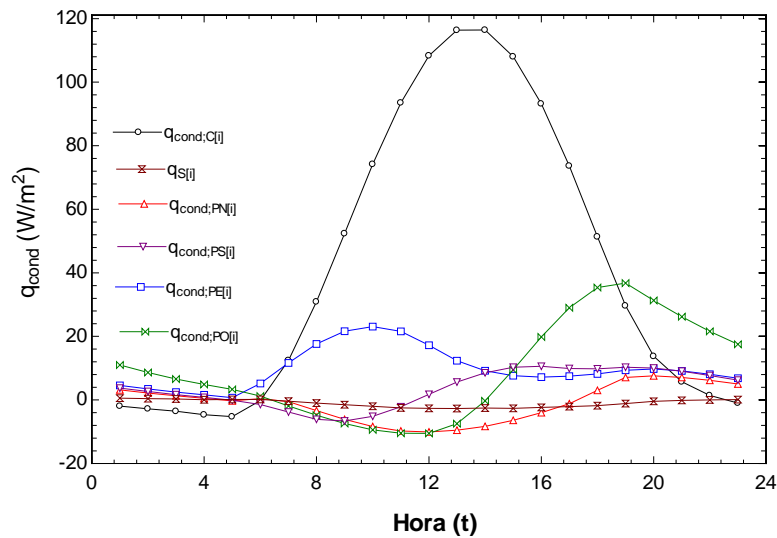


Figura 8.6: Transferencia de calor por conducción en los cerramientos.

- Radiación en los cerramientos, exterior e interior: Muestra el intercambio de calor de cada superficie por radiación.

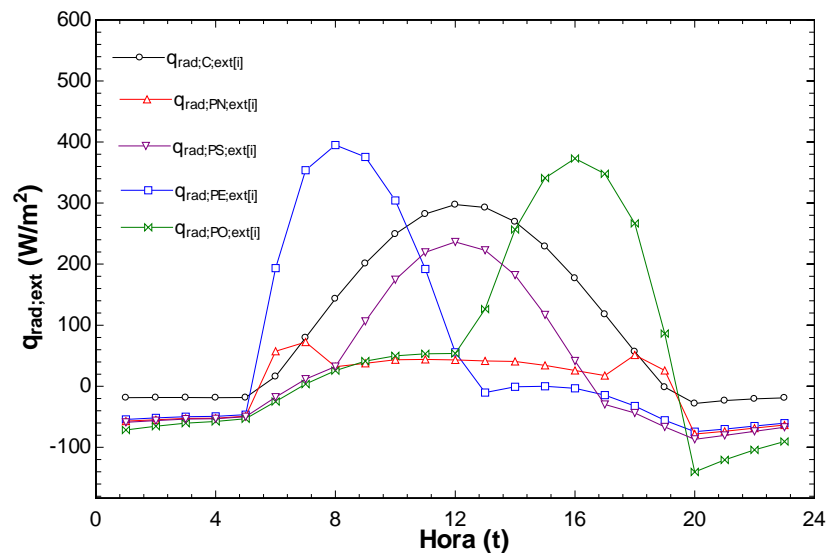


Figura 8.7: Transferencia de calor por radiación en las superficies exteriores de los cerramientos.

Para la radiación exterior el gráfico representa el flujo de calor neto entrante que se obtiene en cada cerramiento. Notemos como la pared este y norte reciben radiación solar de forma más directa debido a la subida y caída del sol.

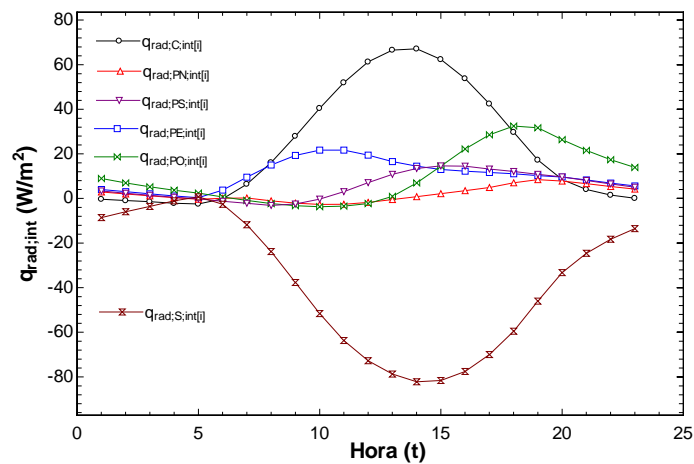


Figura 8.8: Transferencia de calor por radiación en las superficies interiores de los cerramientos.

La radiación en las superficies interiores muestra el intercambio de calor que realizan entre ellas debido a la temperatura que tenga cada una. Se puede deducir que la superficie de mayor temperatura será la de la cubierta al tener una radiación neta positiva. Por otro lado, se deduce que la temperatura del suelo será la de menor temperatura al obtener valores negativos.

- Convección en los cerramientos, exterior e interior: Muestra el intercambio de calor de cada superficie por convección.

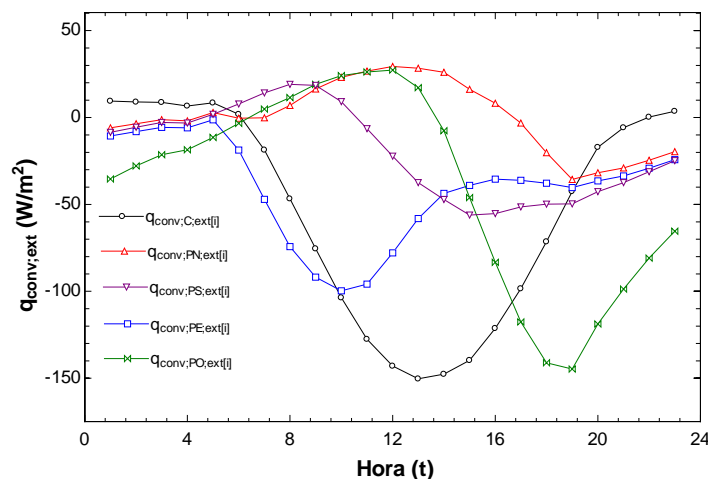


Figura 8.9: Transferencia de calor por convección en las superficies exteriores de los cerramientos.

Para la convección exterior se observa que las curvas son similares pero opuestas a las de radiación exterior. Esto se debe a que gran parte del calor que ganan las superficies por radiación se transmite al aire.

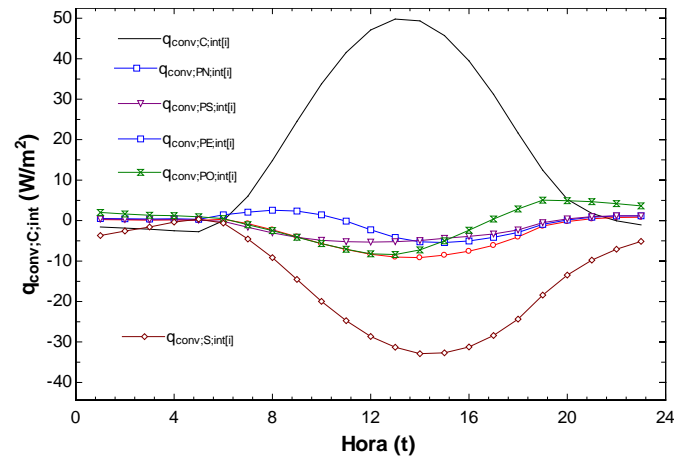


Figura 8.10: Transferencia de calor por convección en las superficies interiores de los cerramientos.

Observando la *figura 8.10* se deduce que la superficie de la cubierta es la que más calor cede al entorno, y la del suelo la que más se lleva.

- Temperaturas superficiales, exteriores e interiores: Se muestran las temperaturas medias de las superficies de los cerramientos.

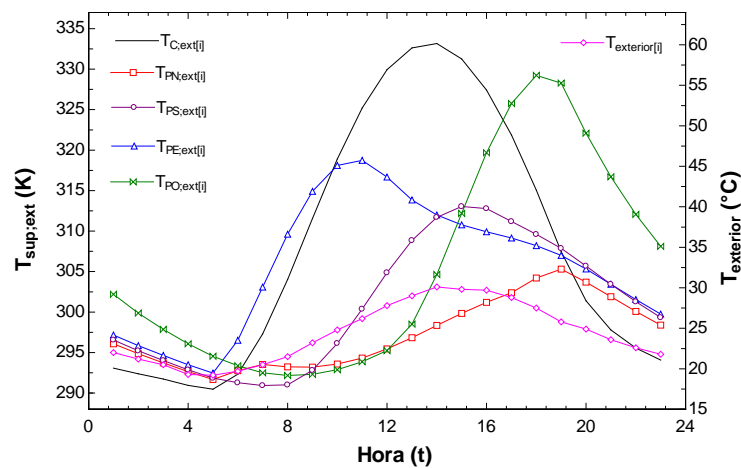


Figura 8.11: Temperaturas medias de las superficies exteriores de los cerramientos.

En la *figura 8.11* se observa como las temperaturas superficiales van aumentando progresivamente con el transcurso del día. Se puede verificar este comportamiento en diferentes literaturas como [31, Fig. 353.1.].

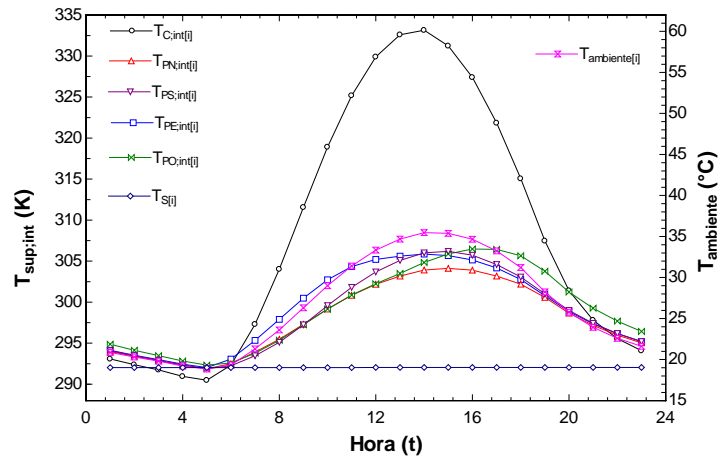


Figura 8.12: Temperaturas medias de las superficies interiores de los cerramientos.

La superficie de la cubierta resulta ser la que más se calienta debido a que los valores por defecto la cubierta está formada por chapa de acero sin aislamiento alguno, mientras que las paredes son de hormigón, con lo cual ofrecen una mayor resistencia térmica.

- Calor almacenado en los cerramientos: Muestra en que cerramientos se almacena más energía calorífica.

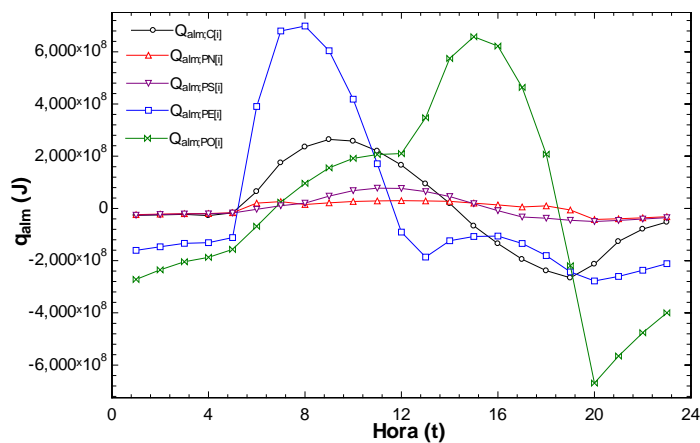


Figura 8.13: Calor almacenado en cada cerramiento.

8.2. Funcionamiento básico del archivo ejecutable

En el archivo ejecutable se encuentra el programa realizado en el entorno EES, tiene la extensión .EXE que permite a cualquier usuario ejecutarlo desde un ordenador. Todo este archivo está basado y fundamentado en el modelo descrito en esta memoria. En este archivo podemos encontrar diversas pantallas y funciones que pueden ser de interés. En este punto se explicarán las funciones más importantes para poder utilizar el programa

correctamente. Prácticamente todas las funciones de interés se van a encontrar en el botón Windows de la barra de herramientas

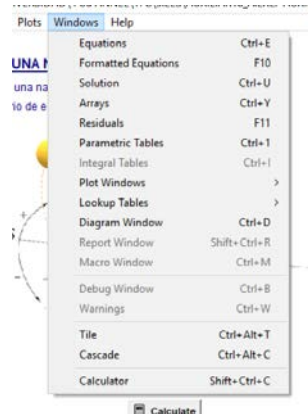


Figura 8.14: Desplegable del botón Windows de la barra de herramientas

Diagram Windows: Se trata de la pantalla principal del programa. Esta permite elegir y escribir los tipos y valores de las variables de entrada. Por un lado, a la izquierda de la pantalla encontramos los datos para la localización, dimensiones, ventilación, climatización y cargas internas. Por otro lado, a la derecha encontramos la elección de los materiales y de los acabados superficiales para todos los cerramientos. Notemos que en los desplegables de los materiales y acabados superficiales existe la opción *Otro*, esta permite introducir los datos del material que el usuario desee. Para introducir dichos valores hay que rellenar las propiedades que vienen debajo de sus respectivos desplegables con el subíndice *Otro*. En todo caso se han establecido unos valores por defecto que se pueden ver en la *figura 8.15*.

CÁLCULO DE LAS TEMPERATURAS EN UNA NAVE

- Estimación del desarrollo de las temperaturas en una nave sin equipos de climatización.
- Estimación de la potencia y consumo mínimo diario de equipos de refrigeración o calefacción.

DIMENSIONES
 Ancho = 12.5 (m)
 Largo = 80 (m)
 Alto = 8 (m)
 e = 0 (°)

LOCALIZACIÓN
 Madrid Ver (D3)
 Día proyecto en:
 Ver - Verano
 Inv - Invierno

VENTILACIÓN
 Renovaciones = 0.5

CLIMATIZACIÓN
 T_{AC} = 25 °C

CARGAS INTERNAS
 Hora_{inicio} = 7 Hora_{fin} = 19 (1-24h)
 Tipo de trabajo: Trabajo moderado
 n_{personas} = 50
 Iluminación: n_{ilum} = 10 (lámparas)
 Maquinaria: Q_{maq} = 2000 (W)
 Electrónica: Q_{elec} = 1200 (W)
 Otras fuentes térmicas: Q_{otros} = 20 (W)
 Hora_{inicio, otros} = 1 Hora_{fin, otros} = 24 (1-24h)

RESULTADOS

CALEFACCIÓN (Invierno)
 Potencia mínima máquina: Q_{maq, calef} = 10.11 kW
 Consumo mínimo diario: Q_{calef} = 20.22 kW h

REFRIGERACIÓN (Verano)
 Potencia mínima máquina: Q_{maq, refri} = 54.75 kW
 Consumo mínimo diario: Q_{refri} = 476.3 kW h


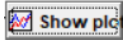
Temperatura ambiente max
 T_{amb, MAX} = 35.47 °C

CUBIERTA
 Material: Chapa de Acero, Espesor (m): 0.01
 Densidad_{Otro}: 100 (kg/m³), C_{especifico, Otro}: 1000 (J/kgK), R_{térmica, Otro}: 1 (m²K/W)
 Acabado superficial: Exterior: Chapa galvanizada, Interior: Chapa galvanizada
 P_{solar, ext, Otro}: 0.6, ε_{ext, Otro}: 0.9, ε_{int, Otro}: 0.9

PARED
 Material: Bloque de hormigón, Espesor (m): 0.2
 Densidad_{Otro}: 100 (kg/m³), C_{especifico, Otro}: 1000 (J/kgK), R_{térmica, Otro}: 1 (m²K/W)
 Acabado superficial: Exterior: Hormigón, Interior: Hormigón
 P_{solar, ext, Otro}: 0.6, ε_{ext, Otro}: 0.9, ε_{int, Otro}: 0.9

SUELO
 Acabado superficial: Pintura - Gris claro
 ε_{int, Otro}: 0.9

Figura 8.15: Pantalla principal con los valores por defecto establecidos (Diagram Windows).

Una vez introducidos todos los datos, se le pulsará el icono  para resolver y obtener los resultados. En esta pantalla también se muestran los valores más significativos del cálculo en el cuadro resultados, donde podemos encontrar el icono de , el cual si pulsamos, nos lleva a otra pantalla de gran interés llamada Plot Windows.

Plot Windows: En esta pantalla es donde podemos encontrar diversas gráficas que fueron explicadas en el punto 8.1 *Variables de salida – Gráficos*. Estos gráficos podrán ser copiados si se hace clic una sola vez sobre el gráfico y posteriormente CTRL+C.

Debido a que los resultados para invierno y verano puede variar significativamente, muchas veces encontraremos que el diagrama no se adapta a las curvas obtenidas, pero se podrán ajustar si arrastramos el eje horizontal superior o inferior hacia arriba o hacia abajo. Otra manera es hacer doble clic sobre los valores de los ejes verticales para cambiar el límite superior en inferior al igual que sus intervalos y así adaptarlo a gusto del usuario. En caso de querer modificar el display del gráfico hay que hacer doble clic sobre el fondo gris en el que se encuentra hasta que aparezca una tabla de herramientas. Esta permite introducir texto, variables de salida, dibujar, hacer zoom (cuando se hace zoom se crea un nuevo gráfico), colocar y localizar ejes.

En el caso de querer realizar un nuevo gráfico con cualquiera de las variables (New Plot Window), graficar sobre un diagrama ya hecho (Overlay Plot) o ajustar funciones matemáticas a las curvas obtenidas (Curve Fit) hay que ir a la barra de herramientas al botón Plot.

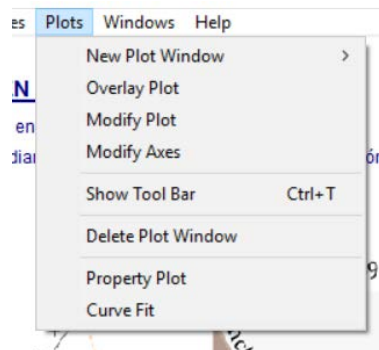


Figura 8.16: Desplegable del botón Plot de la barra de herramientas

En el caso de querer realizar un nuevo gráfico, habrá que tener en cuenta que el “día proyecto” va de dato 25 al 48 y que la tabla de resultados se encuentra en Arrays Table. Además, se podrán hacer gráficos que se actualicen cada vez que calculamos (☒ Automatic update) y añadir su respectiva leyenda (☒ Add legend item).

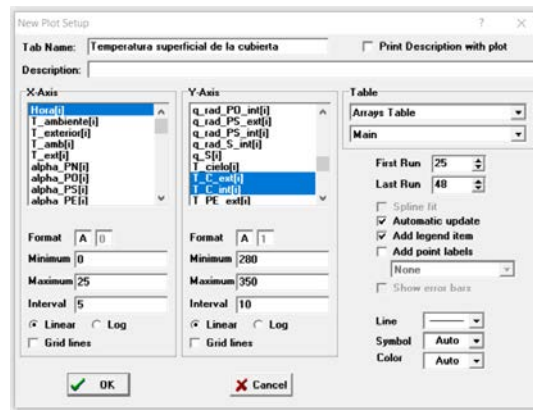


Figura 8.17: Ventana de *New Plot Window X-Y Plot*.

Equations: En esta pantalla encontramos la hoja de código en el que se fundamenta el programa el cual es inmodificable (El código introducido se encuentra en el *Anexo A*).

Formatted Equations: En esta pantalla se muestra el código descrito en la pantalla *Equations* pero de forma más visual.

Solution: Aquí encontramos un listado de los resultados de todas las variables no temporales.

Arrays: En esta ventana se encuentra la tabla de resultados de las variables temporales. Esta pantalla te permite extraer (Copiar) los resultados obtenidos hora a hora de todas las variables (recordemos que el “día proyecto” comienza a partir de la fila 25, previamente se trata del día de calentamiento del sistema).

Residuals: Valores residuales derivados de la resolución iterativa del sistema de ecuaciones.

Lookup Tables: Tablas de variables de entrada: Materiales, acabado superficial, metabolismo y datos meteorológicos por ciudad y régimen (Los datos introducidos se encuentran en el *Anexo B*).

En la barra de herramientas también se pueden encontrar otras funciones de interés como la de imprimir resultados o alguna pantalla, aunque las descritas previamente, son las fundamentales.

8.3. Ejemplo de toma de decisiones constructivas

En este punto plantearemos un caso hipotético de reforma para conocer una de los usos que puede aportar este programa.

Enunciado: Un empresario tiene una nave en Madrid de aproximadamente 1200 m² (20x60x8 m) donde se empaqueta, almacena y distribuye material sanitario. Tiene 18 trabajadores en la fase de empaquetamiento, 12 moviendo, almacenando y ordenando los productos en los estantes y 15 en servicios y administración, todos ellos con un horario laboral de 8 a 17h. Además, disponen para el alumbrado de 110 lámparas de 120W cada una y de maquinaria que se estima que tiene unas pérdidas caloríficas de 5 kW. En la

sección de administración y servicios tienen 8 ordenadores que consumen alrededor de 100 W cada uno y una fotocopidora que representa una potencia media de unos 200W. También disponen de máquinas dispensadoras que consumen en conjunto 1200W y se encuentran en funcionamiento constante. Las paredes de la nave son de hormigón de 25 cm de espesor sin ninguna pintura superficial (color hormigón). La cubierta es de panel sándwich grecado y galvanizado de lana de roca con 4 cm de espesor. La ventilación de la nave se realiza mediante la apertura de puertas y aparatos de ventilación estática que se estima que puede aportar a la nave entre 0,7 y 1 renovación. Este mismo año, el dueño de la nave quiere reparar la cubierta debido al desgaste y a algunas filtraciones que presenta. Además, quiere aumentar el aislamiento térmico debido a que las elevadas temperaturas que se adquieren en verano disminuyen las condiciones y rendimiento de los trabajadores. El dueño habla con los técnicos de obra y elige estudiar dos soluciones de las que le ofrecen.

- Opción 1: Instalar una cubierta deck de 4 cm de lana de roca sobre el panel sándwich previo. La lámina impermeabilizante sería una lámina asfáltica.
- Opción 2: Poner sobre la cubierta existente el revestimiento impermeabilizante y aislante de radiación COOL-R.

Por otro lado, un fabricante de fármacos quiere saber si esta empresa, con quien comparte clientes, podría encargarse del almacenamiento y distribución de algunos de sus productos a partir del 2021 en adelante. Todos los fármacos necesitan permanecer a una temperatura inferior a 18°C.

El dueño de la empresa quiere saber cuál opción de las dos da mejor resultado térmico y que potencia y consumo lleva asociado climatizar su nave para almacenar los fármacos.

Evaluación de las condiciones iniciales:

En primer lugar, introduciremos todos los datos del caso de estudio en el programa a través de la pantalla principal (Diagram Window). Las condiciones más desfavorables a evaluar son en régimen de verano, que serán las estudiadas. Al carecer del dato del color de la superficie del suelo se dejará por defecto. Respectos a las renovaciones de la nave se asumirá un valor medio de 0,9. Una vez expuestas todas las variables le pulsaremos a calcular.

CÁLCULO DE LAS TEMPERATURAS EN UNA NAVE

- Estimación del desarrollo de las temperaturas en una nave sin equipos de climatización.
- Estimación de la potencia y consumo mínimo diario de equipos de refrigeración o calefacción.

DIMENSIONES

Ancho = 20 (m)
Largo = 60 (m)
Alto = 8 (m)
e = 0 (*)

LOCALIZACIÓN

Madrid Ver (D3)
Día proyecto en:
Ver - Verano
Inv - Invierno

VENTILACIÓN

Renovaciones = 0,9

CLIMATIZACIÓN

$T_{AC} = 18$ °C

CARGAS INTERNAS

Horainicio = 8 Horafin = 17 (1-24h)

Trabajadores

Tipo de trabajo Trabajo moderado

$n_{personas} = 45$

Iluminación

$q_{ilum} = 120$ (W / lámpara)
 $n_{ilum} = 110$ (lámparas)

Maquinaria

$q_{maq} = 5000$ (W)

Electrónica

$q_{elec} = 1000$ (W)

Otras fuentes térmicas

$q_{otros} = 1200$ (W)
Horainicio, otros = 1
Horafin, otros = 24

RESULTADOS

CALEFACCIÓN (Invierno)

Potencia mínima máquina
 $q_{maq, calef} = -3,934E-15$ kW

REFRIGERACIÓN (Verano)

Potencia mínima máquina
 $q_{maq, refri} = 85,34$ kW

Temperatura ambiente max
 $T_{amb, MAX} = 30,13$ °C

Consumo mínimo diario
 $Q_{calef} = -6,295E-14$ kW h

Consumo mínimo diario
 $Q_{refri} = 663,1$ kW h

CUBIERTA

Material: Panel Sandwich - Lana de roca
Espesor (m): 0,04
Densidad_{Otro}: 100 (kg/m³)
C_{especifico, Otro}: 1000 (J/kgK)
R_{térmica, Otro}: 1 (m²K/W)

Acabado superficial: Exterior: Chapa galvanizada
Interior: Chapa galvanizada
 $\epsilon_{ext, Otro} = 0,9$
 $\epsilon_{int, Otro} = 0,9$

PARED

Material: Bloque de hormigón
Espesor (m): 0,2
Densidad_{Otro}: 100 (kg/m³)
C_{especifico, Otro}: 1000 (J/kgK)
R_{térmica, Otro}: 1 (m²K/W)

Acabado superficial: Exterior: Hormigón
Interior: Hormigón
 $\epsilon_{ext, Otro} = 0,9$
 $\epsilon_{int, Otro} = 0,9$

SUELO

Acabado superficial: Pintura - Gris claro
 $\epsilon_{int, Otro} = 0,9$

Figura 8.18: Variables de entrada para el caso de estudio.

Desde el cuadro de resultados se puede apreciar como la temperatura máxima que se puede alcanzar a lo largo de un “día proyecto” en verano es de aproximadamente 30 °C. El consumo diario de una máquina para esas circunstancias es de 663 kWh,

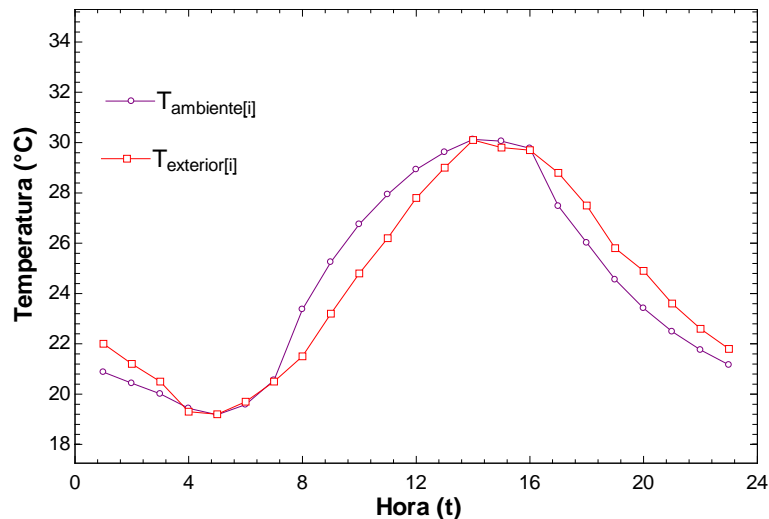


Figura 8.19: Desarrollo de la temperatura ambiente antes de la reforma.

En el gráfico del desarrollo de la temperatura ambiente vemos como la influencia de las cargas internas se hace visible al principio y al final de la jornada laboral (8-17h).

Evaluación de las opciones de reforma:

Para la analizar la *opción 1*, lo único que habrá que cambiar es el espesor y la terminación exterior de la cubierta. Al incluir 4 cm más de lana de roca se podrá considerar como un único panel sándwich de 8cm en total. La lámina asfáltica no representa una suma significativa de resistencia térmica, pero si afecta a las propiedades superficiales exteriores, por lo que habrá que cambiar la terminación superficial exterior a *Lámina asfáltica*.

CUBIERTA

Material	→ Espesor (m)
Panel Sandwich - Lana de roca	0,08
Densidad _{Otro}	C _{especifico} ,Otro
100 (kg/m ³)	1000 (J/kgK)
	R _{térmica} ,Otro
	1 (m ² K/W)
Acabado superficial	Exterior Lámina asfáltica
	P _{solar,ext,Otro} 0,5
	ε _{ext,Otro} 0,9
	Interior Chapa galvanizada
	ε _{int,Otro} 0,9

Figura 8.20: Configuración de la *opción 1*.

Por otro lado, para analizar la *opción 2* la única modificación respecto a la situación previa es la terminación superficial de la parte exterior, que habrá que cambiarla a COOL-R.

CUBIERTA

Material	→ Espesor (m)
Panel Sandwich - Lana de roca	0,04
Densidad _{Otro}	C _{especifico} ,Otro
100 (kg/m ³)	1000 (J/kgK)
	R _{térmica} ,Otro
	1 (m ² K/W)
Acabado superficial	Exterior COOL-R
	P _{solar,ext,Otro} 0,5
	ε _{ext,Otro} 0,9
	Interior Chapa galvanizada
	ε _{int,Otro} 0,9

Figura 8.21: Configuración de la *opción 2*.

Para hacer la comparación de las opciones crearemos tres gráficos con el programa, uno para la temperatura ambiente, otro para las temperaturas superficiales interiores y exteriores de la cubierta y un tercero del consumo de climatización. En todos ellos consideraremos las tres situaciones que nos encontramos: pre-reforma, reforma con opción 1 y reforma con opción 2.

- Temperatura ambiente: Si comparamos la temperatura ambiente media que obtenemos con las tres situaciones, se deduce que la *opción 2* es sin duda la que más reducirá la temperatura en el interior de la nave.

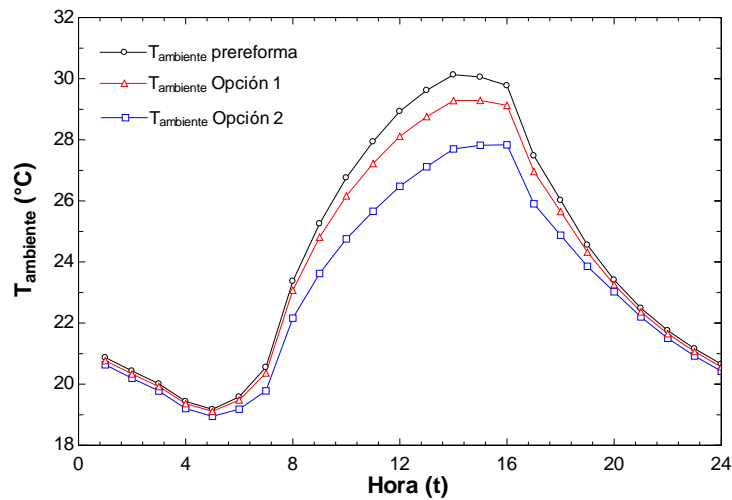


Figura 8.22: Gráfica comparativa de la temperatura ambiente.

- Temperatura superficial de la cubierta: En este caso se observa como la *opción 2* disminuye hasta en 40 °C la temperatura exterior de la cubierta, mientras que la *opción 1* aumenta hasta 15 °C esta misma temperatura. Si analizamos las temperaturas superficiales inferiores, se puede observar como esta misma temperatura de la *opción 1* es muy similar a la temperatura exterior de la *opción 2*. Las dos opciones disminuyen la temperatura inferior sin embargo la *opción 1* lo hace en 4 °C, mientras que la *opción 2* lo hace en 10 °C

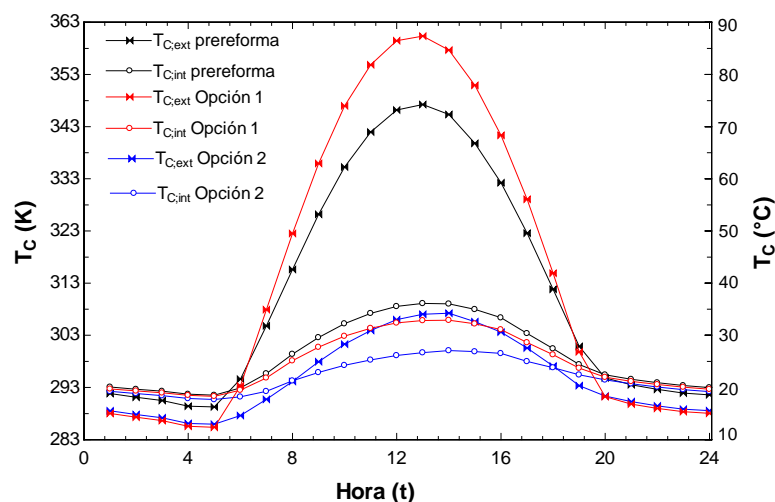


Figura 8.23: Gráfica comparativa de la temperatura superficial inferior y superior en la cubierta.

- Consumo de climatización: Ambas reformas reducirían el consumo de refrigeración, sin embargo, la *opción 2* da mejores resultados.

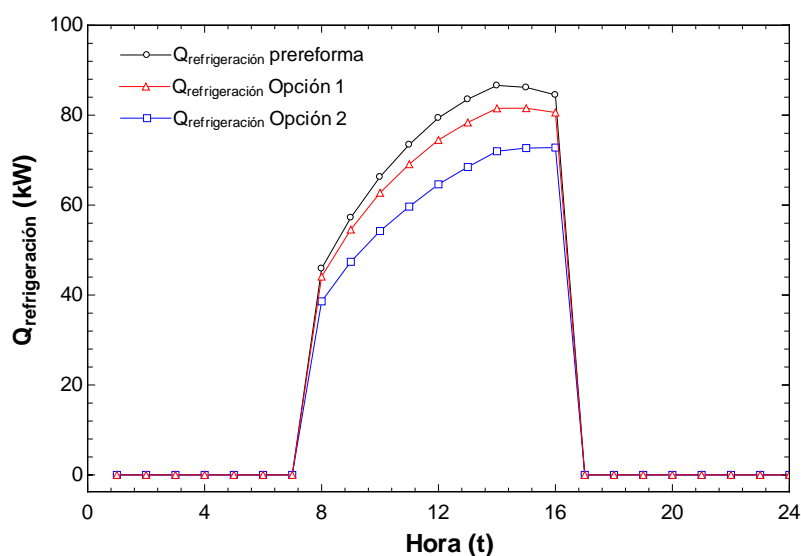


Figura 8.24: Gráfica comparativa del consumo que supondría climatizar la nave.

Ahora analizaremos los datos más representativos para la comparación.

TABLA 8.1: COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS PARA LA PRE-REFORMA, OPCIÓN 1 Y OPCIÓN 2.

	Temperatura media (°C)	Temperatura máxima (°C)	Potencia de máquina (kW)	Consumo diario de máquina (kWh)
Pre-reforma	27,98	30,13	85,34	663,1
Opción 1	27,32	29,29	81,07	627
Opción 2	25,90	27,83	72,74	550,4

Como ya deducíamos con las gráficas, con la *opción 2* se logran mejores resultados. La temperatura ambiente interior se llega a reducir hasta 2 °C dejándola en un rango de temperaturas adecuado para el trabajo. Además, reduce el consumo diario hasta 110kWh, el cual es un ahorro muy significativo tanto en coste económicos como en contaminación.

Después de este análisis, se puede concluir que la *opción 2* es sin duda la que le recomendaríamos al dueño de la empresa. Incluso, visto que el aislamiento de radiación soluciona su problema en verano, podrían analizarse una *opción 3*, que incluya el revestimiento de cubierta COOL-R y pintura blanca para las superficies exteriores de la fachada. Si comparamos rápidamente los datos significativos de la *opción 2* y *3* se obtiene

la *tabla 8.2*, donde reducimos la temperatura interna hasta 1°C y el consumo en 50 kWh. Por lo que concluimos, que las *opciones 2 y 3* son las más eficientes y las más se ajustan a los requisitos de este problema.

TABLA 8.2: COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS PARA LA OPCIÓN 2 Y OPCIÓN 3.

	Temperatura media (°C)	Temperatura máxima (°C)	Potencia de máquina (kW)	Consumo diario de maquina (kWh)
Opción 2	25,90	27,83	72,74	550,4
Opción 3	25,09	26,88	66,89	506,3

9. CONCLUSIONES FINALES DEL PROYECTO

9.1. Conclusiones

A lo largo de este proyecto se ha desarrollado un modelo matemático para conocer el comportamiento térmico de una nave industrial. Más tarde se ha introducido este mismo modelo en un entorno de programación (EES) para verificar su correcto funcionamiento como algoritmo de un programa de cálculo. Tras evaluar los resultados que se obtienen a partir de dicho programa, se puede afirmar que su realización ha sido exitosa, cumpliendo así con el objetivo de este trabajo. Se ha logrado desarrollar una herramienta de cálculo que permite conocer el comportamiento térmico de un edificio sin climatización de manera rápida, sencilla e intuitiva. No se trata de un modelo que busque la exactitud, si no la semejanza a la realidad, para así servir de ayuda a la hora de tomar ciertas decisiones sobre el acondicionamiento térmico de una nave industrial. Además, se abre una puerta al análisis de los aislamientos de radiación, los cuales se ha demostrado que obtienen muy buenos resultados a la hora de acondicionar una nave. También se podrán tener en cuenta otros materiales para los cerramientos, ya sean superficiales o no, como pueden ser los cerramientos ajardinados o productos innovadores.

Las limitaciones de la demanda energética y la concienciación social sobre el medioambiente y el ecologismo están provocando que nos dirijamos hacia un modelo social donde los recursos se utilicen de forma más inteligente y eficiente, generando así menos residuos y contaminación. Para poder avanzar en esta dirección veo esencial el uso de la tecnología para poder simular y con ello conocer nuestro entorno más afondo. Este proyecto intenta servir de herramienta para mejorar en las decisiones sobre el acondicionamiento térmico y así ajustarnos a unas condiciones de bienestar más respetuosas con nuestro entorno.

9.2. Desarrollo futuro

La dirección que debería tomar este proyecto en el futuro sería de ampliación del mismo, profundizando más en lo realizado y analizando otros conceptos que no han sido considerados. Los puntos que considero que habría que profundizar más en trabajos futuros son:

- Mayor semejanza a la transferencia de calor en régimen transitorio. En este trabajo se ha optado por un análisis en estado permanente que simulaba uno transitorio discreto como ya explicamos. Sin embargo, una vez obtenidos los resultados de las temperaturas horarias, se podrían buscar valores intermedios a las mismas mediante iteraciones o bien linealizar la evolución de estas, de tal forma que la transferencia de calor se vaya asemejando más a la de un régimen transitorio continuo. Para ello sería necesario un entorno de programación más potente.
- Profundizar más en el comportamiento térmico y la transferencia de calor de la solera.
- Establecer diversos modos de cálculo según los datos meteorológicos. Uno con unos datos asociados a condiciones extremas, otro asociado a unos valores medios

y un tercero asociado a la base de datos [3] donde se elija los datos del día proyecto de forma aleatoria, convirtiéndolo así en un programa de simulación.

Respecto a los aspectos que considero que habría que tener en cuenta para trabajos futuros son:

- Añadir la posibilidad de considerar puentes térmicos, ventanas, lucernarios y puertas.
- Añadir paneles solares como posibilidad de acabado superficial, para así estudiar sus beneficios térmicos a parte de los beneficios de aprovechamiento energético.
- Simular otras formas geométricas estructurales para ampliar las posibilidades de uso del modelo.
- Estudiar la posibilidad de introducir habitáculos y separaciones interiores.
- Estudiar la estratificación del aire en espacios habitables.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. J. Neila Gonzalez, *Acondicionamiento ambiental y habitabilidad del espacio arquitectónico*, Madrid: Munilla-Lería, 2013.
- [2] *Documento Básico HE - Ahorro de energía*, Código Técnico de la Edificación, Ministerio de Fomento, España, 2017.
- [3] *Archivos de datos de todas las zonas climáticas*, Documentos de apoyo del Documento Básico HE - Ahorro de energía, Código Técnico de la Edificación, Ministerio de Fomento. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-ahorro-energia.html>
- [4] D. Mallo Alonso, “Diseño y cálculo de nave industrial para la fabricación de aereogeneradores”, Trabajo de fin de grado, Departamento de Mecánica y Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecas.uc3m.es>
- [5] RAÚL CARMONA MUÑOZ, “Cómo calcular nave industrial o galpón con CYPE3D”, *Youtube*, 25 de octubre de 2015. [Video en línea] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=6Hrh1BsveA4>
- [6] “LG 38 - Chapa grecada LG38 de aluminio para el revestimiento de paredes”, ISOPAN. [En línea]. Disponible en: <http://www.isopan.es/chapas-grecadas/lg-38>
- [7] “Chapa perfilada”, DISMONTE. [En línea]. Disponible en: <http://www.dismonte.com/es/cubiertas/sin-aislamiento/chapa-perfilada.html>
- [8] “LG 38 - Chapa grecada LG 38 de aluminio para el revestimiento de paredes”, ISOPAN. [En línea]. Disponible en: <http://www.isopan.es/chapas-grecadas/lg-38>
- [9] Manuj, “Cubierta Deck autoprotegida para naves industriales [detalles y ventajas 2018]”, *Reforma Coruña*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://reformacoruna.com/cubierta-deck-autoprotegida/>
- [10] “Home”, Vibrados y Pretensados Manacor, S. A. [En línea]. Disponible en: <http://www.vipsa.com/>
- [11] “Panel industrial”, EIROS. [En línea]. Disponible en: <http://www.eiros.es/productos.php?id=14&ids=22&idp=86>
- [12] “Bloque de hormigón”, J. Linares e Hijos S.L. [En línea]. Disponible en: <http://www.materialeslinares.com/Bloque-hormigon-40x40x20>
- [13] Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción con la colaboración de CEPCE y AICIA, “CATÁLOGO DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DEL CTE”, Código Técnico de la Edificación, Ministerio de Fomento, España, 2010.

- [14] “Código Técnico de la Edificación web”, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y el Instituto de la Construcción de Castilla y León (ICCL) Disponible en: <http://cte-web.iccl.es/>
- [15] AICIA, *Condiciones de aceptación de Procedimientos alternativos a LIDER y CALENER*, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Ministerio de Vivienda, España, 2009.
- [16] F. P. Incropera y D. P. DeWitt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, 4ª ed. México: PRENTICE HALL, 1999.
- [17] A. F. Mills, *Transferencia de Calor*, España: Addison-Wesley Iberoamericana, S. A./ Times Mirror de España, S. A. - IRWIN, 1995
- [18] *Factores de reflexión de diversos colores*, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. [En línea]. Disponible en: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/GuiasMonitor/Ergonomia/V/Ficheros/ev25.pdf>
- [19] “COOL-R”, Grupo SELENA. [En línea]. Disponible en: <http://cool-r.es/>
- [20] M. Chaves, “Reflectancia de materiales y colores”, *Prezi*, 16 de febrero del 2016. [En línea]. Disponible en: <https://prezi.com/jp73wz25jvx8/reflectancia-de-materiales-y-colores/>
- [21] “Tabla de emisividades para infrarrojos”, SRC. [En línea]. Disponible en: https://srcsl.com/catalogoPDFs/AreaTecnica/TABLAS_EMITIVIDAD_SENSORES_I_NFRARROJOS.PDF
- [22] “Tabla de emisividades”, testo. [En línea]. Disponible en: https://www.testo.com/es-ES/Emisividades+de+los+materiales+m%C3%A1s+importantes/services_knowledgeable_thermography_emissivity_table
- [23] *Datos Meteorológicos*, Ministerio para la transición ecológica [En línea]. Disponible en: <http://www.mincotur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/documentosreconocidos.aspx>
- [24] *Documento descriptivo climas de referencia*, Documentos de apoyo del Documento Básico HE - Ahorro de energía, Código Técnico de la Edificación, Ministerio de Fomento, España, 2017.
- [25] *Liquid Materials Handbook*, 23ª ed., Atomic Energy Commission, Department of Navy, Washington, DC, 1952.
- [26] Carrier Air Conditioning Co., *MANUAL DE AIRE ACONDICIONADO*, 6ª ed. Barcelona: MARCOMBO, S. A., 1983.
- [27] *NTP 323: Determinación del metabolismo energético*, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, España, 1993.

[28] *Cálculo de parámetros característicos de la envolvente*, Documentos de apoyo del Documento Básico HE - Ahorro de energía, Código Técnico de la Edificación, Ministerio de Fomento, España, 2017.

[29] “Posición Solar”, SunEarthTools. [En línea]. Disponible en:

https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es

[30] *Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios (RITE)*, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, España, 2013.

[31] Recknagel, Sprenger y W. Hönnmann, *Manual Técnico de Calefacción y Aire Acondicionado*, 1ª ed. Madrid: BELLISCO, 2000

ANEXO A

En el siguiente anexo encontraremos el código introducido en el entorno EES para la realización del programa.

```

1:
2: " _____ INPUTS
   "
3:
4: //Densidad
5: Densidad_C_1=lookup('Materiales';1;Material_Cubierta$)
6: Densidad_P_1=lookup('Materiales';1;Material_Pared$)
7:
8: //Capacidad térmica
9: C_C_1=lookup('Materiales';2;Material_Cubierta$)
10: C_P_1=lookup('Materiales';2;Material_Pared$)
11:
12: //Conductividad térmica
13: k_C=lookup('Materiales';3;Material_Cubierta$)
14: k_P=lookup('Materiales';3;Material_Pared$)
15:
16: //Resistencia térmica
17: R_C_1=e_C/k_C
18: R_P_1=e_P/k_P
19:
20: //Atención! no se puede meter ningun otro material con C=1
21: Densidad_C=if(C_C_1;1;Densidad_C_1;Densidad_C_otro;Densidad_C_1)
22: C_C=if(C_C_1;1;C_C_1;C_C_otro;C_C_1)
23: R_C=if(C_C_1;1;R_C_1;R_C_otro;R_C_1)
24: Densidad_P=if(C_P_1;1;Densidad_P_1;Densidad_P_otro;Densidad_P_1)
25: C_P=if(C_P_1;1;C_P_1;C_P_otro;C_P_1)
26: R_P=if(C_P_1;1;R_P_1;R_P_otro;R_P_1)
27:
28: //Propiedades de radiación
29:
30: epsilon_C_ext_1=lookup('Acabado superficial';1;Acabado_Cubierta_ext$)
31: rho_solar_C_ext_1=lookup('Acabado superficial';2;Acabado_Cubierta_ext$)
32: epsilon_C_ext=if(rho_solar_C_ext_1;1;epsilon_C_ext_1;epsilon_C_ext_otro;epsilon_C_ext_1)
33:
34: rho_solar_C_ext=if(rho_solar_C_ext_1;1;rho_solar_C_ext_1;rho_solar_C_ext_otro;rho_solar_C_ext_1)
35: rho_C_ext=1-epsilon_C_ext
36:
37: epsilon_C_int_1=lookup('Acabado superficial';1;Acabado_Cubierta_int$)
38: epsilon_C_int=if(epsilon_C_int_1;1;epsilon_C_int_1;epsilon_C_int_otro;epsilon_C_int_1)
39: rho_C_int=1-epsilon_C_int
40:
41: epsilon_S_1=lookup('Acabado superficial';1;Acabado_Suelo$)
42: epsilon_S=if(epsilon_S_1;1;epsilon_S_1;epsilon_S_otro;epsilon_S_1)
43: rho_S=1-epsilon_S
44:
45: rho_solar_P_ext_1=lookup('Acabado superficial';2;Acabado_Pared_ext$)
46: epsilon_P_ext_1=lookup('Acabado superficial';1;Acabado_Pared_ext$)
47: epsilon_P_ext=if(rho_solar_P_ext_1;1;epsilon_P_ext_1;epsilon_P_ext_otro;epsilon_P_ext_1)
48: rho_solar_P_ext=if(rho_solar_P_ext_1;1;rho_solar_P_ext_1;rho_solar_P_ext_otro;rho_solar_P_ext_1)
49: rho_P_ext=1-epsilon_P_ext
50:
51: epsilon_P_int_1=lookup('Acabado superficial';1;Acabado_Pared_int$)
52: epsilon_P_int=if(epsilon_P_int_1;1;epsilon_P_int_1;epsilon_P_int_otro;epsilon_P_int_1)
53: rho_P_int=1-epsilon_P_int
54:
55: epsilon_T=0,8
56: rho_T=0,2
57: rho_solar_T=0,2signo

```

```

57:
58:
59: "_____ CONSTANTES
60:
61: "PROPIEDADES DEL AIRE"
62:
63: T_aire=if(T_Ver_o_Inv;1;0;273+10;273+30)
64: P_aire=101,325: R_aire=HR_aire/100 : HR_aire=50
65:
66: Densidad_aire=density(AirH2O;T=T_aire;R=R_aire;P=P_aire)
67: Cp_aire=cp(AirH2O;T=T_aire;R=R_aire;P=P_aire)
68: mu_aire=viscosity(AirH2O;T=T_aire;R=R_aire;P=P_aire)
69: nu_aire=mu_aire/Densidad_aire
70: k_aire=conductivity(AirH2O;T=T_aire;R=R_aire;P=P_aire)
71: Pr_aire=prandtl(AirH2O;T=T_aire;R=R_aire;P=P_aire)
72: h_fg_aire=enthalpy_vaporization(Water;T=(T_AC+273))
73: w_amb=humrat(AirH2O;T=(T_AC+273);R=0,38;P=P_aire)
74:
75: "OTRAS"
76: L_terreno=850
77: t=3600
78:
79: L_S=100
80: Densidad_S=2000
81: C_S=1000
82:
83:
84:
85: "_____ CALCULOS
PREVIOS"
86:
87: "-----DIMENSIONES DE LA NAVE"
88:
89: A_C=Largo*Ancho
90: A_S= A_C
91: A_P1=Alto*Ancho
92: A_P2=Alto*Largo
93:
94: P_S=2*Ancho+2*Largo
95: V=Alto*Ancho*Largo
96:
97: V_C=A_C*e_C
98: V_P1=A_P1*e_P
99: V_P2=A_P2*e_P
100:
101: V_S=A_S*L_S
102:
103: "-----COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN SUELO"
104:
105: B_S=2*A_S/P_S
106:
107: U_S=2,5385*B_S^(-0,703)
108:
109: "-----FACTORES DE FORMA"
110:
111: //Verificación
112:
113: F_C=F_CS+2*F_CP1+2*F_CP2
114: F_S=F_SC+2*F_SP1+2*F_SP2
115: F_P1=F_P1C+F_P1S+F_P1P1+2*F_P1P2
116: F_P2=F_P2C+F_P2S+2*F_P2P1+F_P2P2
117:
118: //Paredes paralelas
119:
120:
121: X_CS=Largo/Alto
122: Y_CS=Ancho/Alto

```



```

123: F_CS=(2/(PI#*X_CS*Y_CS))*(ln((((1+X_CS^2)*(1+Y_CS^2))/(1+X_CS^2+Y_CS^2))^0,5) +
X_CS*(1+Y_CS^2)^0,5
*arctan(X_CS/(1+Y_CS^2)^0,5) + Y_CS*(1+X_CS^2)^0,5*arctan(Y_CS/(1+X_CS^2)^0,5)-
X_CS*arctan(X_CS) - Y_CS
*arctan(Y_CS))
124:
125: F_SC=F_CS
126:
127: X_P1P1=Ancho/Largo
128: Y_P1P1=Alto/Largo
129:
F_P1P1=(2/(PI#*X_P1P1*Y_P1P1))*(ln((((1+X_P1P1^2)*(1+Y_P1P1^2))/(1+X_P1P1^2+Y_P1P1^2))^0,5)
+ X_P1P1*(1
+Y_P1P1^2)^0,5*arctan(X_P1P1/(1+Y_P1P1^2)^0,5) + Y_P1P1*(1+X_P1P1^2
)^0,5*arctan(Y_P1P1/(1+X_P1P1^2)^0,5)-
X_P1P1*arctan(X_P1P1) - Y_P1P1*arctan(Y_P1P1))
130:
131:
132: X_P2P2=Largo/Ancho
133: Y_P2P2=Alto/Ancho
134:
F_P2P2=(2/(PI#*X_P2P2*Y_P2P2))*(ln((((1+X_P2P2^2)*(1+Y_P2P2^2))/(1+X_P2P2^2+Y_P2P2^2))^0,5)
+ X_P2P2*(1
+Y_P2P2^2)^0,5*arctan(X_P2P2/(1+Y_P2P2^2)^0,5) + Y_P2P2*(1+X_P2P2^2
)^0,5*arctan(Y_P2P2/(1+X_P2P2^2)^0,5)-
X_P2P2*arctan(X_P2P2) - Y_P2P2*arctan(Y_P2P2))
135:
136:
137: //Paredes contiguas
138:
139:
140: H_CP1 =Alto/Ancho
141: W_CP1=Largo/Ancho
142: F_CP1=(1/(W_CP1*PI#))*(W_CP1*arctan(1/W_CP1) + H_CP1*arctan(1/H_CP1) -
(H_CP1^2+W_CP1^2)^0,5*arctan(1
/(H_CP1^2+W_CP1^2)^0,5)
+0,25*ln((((H_CP1^2+1)*(1+W_CP1^2))/(H_CP1^2+W_CP1^2+1))*((W_CP1^2*(H_CP1^2
+W_CP1^2+1))/((1+W_CP1^2)*(H_CP1^2+W_CP1^2)))^(W_CP1^2)*((H_CP1^2*(H_CP1^2+W_CP1^2+1)
)/((1+H_CP1^2)
*(H_CP1^2+W_CP1^2)))^(H_CP1^2) ) )
143:
144: H_CP2 =Alto/Largo
145: W_CP2=Ancho/Largo
146: F_CP2=(1/(W_CP2*PI#))*(W_CP2*arctan(1/W_CP2) + H_CP2*arctan(1/H_CP2) -
(H_CP2^2+W_CP2^2)^0,5*arctan(1
/(H_CP2^2+W_CP2^2)^0,5)
+0,25*ln((((H_CP2^2+1)*(1+W_CP2^2))/(H_CP2^2+W_CP2^2+1))*((W_CP2^2*(H_CP2^2
+W_CP2^2+1))/((1+W_CP2^2)*(H_CP2^2+W_CP2^2)))^(W_CP2^2)*((H_CP2^2*(H_CP2^2+W_CP2^2+1)
)/((1+H_CP2^2)
*(H_CP2^2+W_CP2^2)))^(H_CP2^2) ) )
147:
148: F_SP1=F_CP1
149: F_SP2=F_CP2
150:
151:
152: H_P1C =Largo/Ancho
153: W_P1C=Alto/Ancho
154: F_P1C=(1/(W_P1C*PI#))*(W_P1C*arctan(1/W_P1C) + H_P1C*arctan(1/H_P1C) -
(H_P1C^2+W_P1C^2)^0,5*arctan(1
/(H_P1C^2+W_P1C^2)^0,5)
+0,25*ln((((H_P1C^2+1)*(1+W_P1C^2))/(H_P1C^2+W_P1C^2+1))*((W_P1C^2*(H_P1C^2
+W_P1C^2+1))/((1+W_P1C^2)*(H_P1C^2+W_P1C^2)))^(W_P1C^2)*((H_P1C^2*(H_P1C^2+W_P1C^2+1)
)/((1+H_P1C^2)
*(H_P1C^2+W_P1C^2)))^(H_P1C^2) ) )
155:
156: F_P1S=F_P1C
157:

```

```

158: H_P1P2=Largo/Alto
159: W_P1P2=Ancho/Alto
160: F_P1P2=(1/(W_P1P2*PI#))*(W_P1P2*arctan(1/W_P1P2) + H_P1P2*arctan(1/H_P1P2) -
(H_P1P2^2+W_P1P2^2)^0,5
*arctan(1/(H_P1P2^2+W_P1P2^2)^0,5)
+0,25*ln((((H_P1P2^2+1)*(1+W_P1P2^2))/(H_P1P2^2+W_P1P2^2+1))*((W_P1P2^2
*(H_P1P2^2+W_P1P2^2+1))/((1+W_P1P2^2)*(H_P1P2^2+W_P1P2^2)))^(W_P1P2^2)*((H_P1P2^2*(H_P
1P2^2+W_P1P2
^2+1))/((1+H_P1P2^2)*(H_P1P2^2+W_P1P2^2)))^(H_P1P2^2) ) )
161:
162:
163: H_P2C =Ancho/Largo
164: W_P2C=Alto/Largo
165: F_P2C=(1/(W_P2C*PI#))*(W_P2C*arctan(1/W_P2C) + H_P2C*arctan(1/H_P2C) -
(H_P2C^2+W_P2C^2)^0,5*arctan(1
/(H_P2C^2+W_P2C^2)^0,5)
+0,25*ln((((H_P2C^2+1)*(1+W_P2C^2))/(H_P2C^2+W_P2C^2+1))*((W_P2C^2*(H_P2C^2
+W_P2C^2+1))/((1+W_P2C^2)*(H_P2C^2+W_P2C^2)))^(W_P2C^2)*((H_P2C^2*(H_P2C^2+W_P2C^2+1))
)/((1+H_P2C^2)
*(H_P2C^2+W_P2C^2)))^(H_P2C^2) ) )
166:
167: F_P2S = F_P2C
168:
169: H_P2P1 =Ancho/Alto
170: W_P2P1=Largo/Alto
171: F_P2P1=(1/(W_P2P1*PI#))*(W_P2P1*arctan(1/W_P2P1) + H_P2P1*arctan(1/H_P2P1) -
(H_P2P1^2+W_P2P1^2)^0,5
*arctan(1/(H_P2P1^2+W_P2P1^2)^0,5)
+0,25*ln((((H_P2P1^2+1)*(1+W_P2P1^2))/(H_P2P1^2+W_P2P1^2+1))*((W_P2P1^2
*(H_P2P1^2+W_P2P1^2+1))/((1+W_P2P1^2)*(H_P2P1^2+W_P2P1^2)))^(W_P2P1^2)*((H_P2P1^2*(H_P
2P1^2+W_P2P1
^2+1))/((1+H_P2P1^2)*(H_P2P1^2+W_P2P1^2)))^(H_P2P1^2) ) )
172:
173:
174: H_P1T =L_terreno/Ancho
175: W_P1T=Alto/Ancho
176: F_P1T=(1/(W_P1T*PI#))*(W_P1T*arctan(1/W_P1T) + H_P1T*arctan(1/H_P1T) -
(H_P1T^2+W_P1T^2)^0,5*arctan(1
/(H_P1T^2+W_P1T^2)^0,5)
+0,25*ln((((H_P1T^2+1)*(1+W_P1T^2))/(H_P1T^2+W_P1T^2+1))*((W_P1T^2*(H_P1T^2
+W_P1T^2+1))/((1+W_P1T^2)*(H_P1T^2+W_P1T^2)))^(W_P1T^2)*((H_P1T^2*(H_P1T^2+W_P1T^2+1))
(1+H_P1T^2)
*(H_P1T^2+W_P1T^2)))^(H_P1T^2) ) )
177:
178: F_P1Cielo=1-F_P1T
179:
180: H_P2T =L_terreno/Largo
181: W_P2T=Alto/Largo
182: F_P2T=(1/(W_P2T*PI#))*(W_P2T*arctan(1/W_P2T) + H_P2T*arctan(1/H_P2T) -
(H_P2T^2+W_P2T^2)^0,5*arctan(1
/(H_P2T^2+W_P2T^2)^0,5)
+0,25*ln((((H_P2T^2+1)*(1+W_P2T^2))/(H_P2T^2+W_P2T^2+1))*((W_P2T^2*(H_P2T^2
+W_P2T^2+1))/((1+W_P2T^2)*(H_P2T^2+W_P2T^2)))^(W_P2T^2)*((H_P2T^2*(H_P2T^2+W_P2T^2+1))
(1+H_P2T^2)
*(H_P2T^2+W_P2T^2)))^(H_P2T^2) ) )
183:
184: F_P2Cielo=1-F_P2T
185:
186: "-----COEFICIENTES DE CONVECIÓN"
187:
188: //Reynolds
189: Re_Xcr=5*10^5
190: Re_Xcr=(Vel_ext*Densidad_air*Xcr_ext)/mu_air
191:
192: //CUBIERTA
193: Re_C_ext=(Vel_ext*Densidad_air*Largo)/mu_air
194: X_C_ext=Xcr_ext/Largo

```

```

195:
196: //Laminar
197: Nusselt_C_ext_lam=0,664*Re_C_ext^(0,5)*Pr_air^(1/3)
198: h_C_ext_lam=Nusselt_C_ext_lam*k_air/Largo
199:
200: //Mixto
201: Nusselt_C_ext_mixt=(0,037*Re_C_ext^(4/5)-871)*Pr_air^(1/3)
202: h_C_ext_mixt=Nusselt_C_ext_mixt*k_air/Largo
203:
204: //Turbulento - Ts uniforme
205: Nusselt_C_ext_turb=0,037*Re_C_ext^(4/5)*Pr_air^(1/3)
206: h_C_ext_turb=Nusselt_C_ext_turb*k_air/Largo
207:
208:
h_C_ext=if(X_C_ext;0,05;h_C_ext_turb;h_C_ext_turb;if(X_C_ext;0,95;h_C_ext_mixt;h_C_ext_lam;h_C_ext_lam))
209:
210: //PARED TIPO P1
211: Re_P1_ext=(Vel_ext*Densidad_air*Ancho)/mu_air
212: X_P1_ext=Xcr_ext/Ancho
213:
214: "Laminar"
215: Nusselt_P1_ext_lam=0,664*Re_P1_ext^(0,5)*Pr_air^(1/3)
216: h_P1_ext_lam=Nusselt_P1_ext_lam*k_air/Ancho
217:
218: "Mixto"
219: Nusselt_P1_ext_mixt=(0,037*Re_P1_ext^(4/5)-871)*Pr_air^(1/3)
220: h_P1_ext_mixt=Nusselt_P1_ext_mixt*k_air/Ancho
221:
222: "Turbulento - Ts uniforme"
223: Nusselt_P1_ext_turb=0,037*Re_P1_ext^(4/5)*Pr_air^(1/3)
224: h_P1_ext_turb=Nusselt_P1_ext_turb*k_air/Ancho
225:
226:
h_P1_ext=if(X_P1_ext;0,05;h_P1_ext_turb;h_P1_ext_turb;if(X_P1_ext;0,95;h_P1_ext_mixt;h_P1_ext_lam;h_P1_ext_lam))
227:
228: h_P2_ext=h_C_ext
229:
230: h_int=2
231:
232: "_____ CARGAS INTERNAS"
233:
234:
235: //Ocupación
236: q_personas=lookup('Metabolismo';1;Tipo_trabajo$)
237: f_qsensible_28=15,29*q_personas^(-0,73)
238: f_qsensible_25=12,576*q_personas^(-0,639)
239: f_qsensible_21=7,8703*q_personas^(-0,505)
240:
241:
242: "_____ CALCULOS
CONTADOR_____ "
243:
244: "_____ DATOS LOOKUP TABLE"
245:
246:
247: //Temperaturas
248: T_amb[1]=lookup(Localizacion$;1;4) +273
249:
250:
251: //Localizacion$
252:
253: T_C[1]=lookup(Localizacion$;1;'Temp seca') +273
254: T_PN[1]=lookup(Localizacion$;1;'Temp seca') +273
255: T_PS[1]=lookup(Localizacion$;1;'Temp seca') +273
256: T_PE[1]=lookup(Localizacion$;1;'Temp seca') +273

```

```

257: T_PO[1]=lookup(Localizacion$,1;'Temp seca') +273
258:
259: //-----Cambio
260:
261: T_Ver_o_Inv=lookup(Localizacion$,1;'Mes')
262: T_S[1]=if(T_Ver_o_Inv;1;0;273+10;273+19)
263:
264:
265: Vel_ext=avglookup(Localizacion$;'Vel viento';25;48)
266:
267: Duplicate i=2;48
268:
269:
270: Hora[i]=lookup(Localizacion$;i;'Hora')
271: T_ext[i]=lookup(Localizacion$;i;'Temp seca') +273
272: T_cielo[i]=lookup(Localizacion$;i;'Temp cielo') +273
273: G_directa[i]= lookup(Localizacion$;i;'Rad directa')
274: G_difusa[i]= lookup(Localizacion$;i;'Rad difusa')
275: Azimut[i]=lookup(Localizacion$;i;'Azimut')
276: Cenit[i]=lookup(Localizacion$;i;'Cenit')
277: w_ext[i]=lookup(Localizacion$;i;'Hum abs')
278:
279:
280:
281: "-----CONDUCCIÓN"
282:
283: q_cond_C[i]=(T_C_ext[i]-T_C_int[i])/R_C
284:
285: q_cond_PN[i]=(T_PN_ext[i]-T_PN_int[i])/R_P
286: q_cond_PS[i]=(T_PS_ext[i]-T_PS_int[i])/R_P
287: q_cond_PE[i]=(T_PE_ext[i]-T_PE_int[i])/R_P
288: q_cond_PO[i]=(T_PO_ext[i]-T_PO_int[i])/R_P
289:
290: q_S[i]=U_S*(T_ext[i]-T_amb[i])
291:
292:
293:
294: "-----CONVECCIÓN"
295:
296: //Exterior -- Las h no son temporales en este programa porque se excedería el límite de variables
(>6000)
297: q_conv_C_ext[i]=h_C_ext*(T_ext[i]-T_C_ext[i])
298:
299: q_conv_PN_ext[i]=h_P1_ext*(T_ext[i]-T_PN_ext[i])
300: q_conv_PS_ext[i]=h_P1_ext*(T_ext[i]-T_PS_ext[i])
301: q_conv_PE_ext[i]=h_P2_ext*(T_ext[i]-T_PE_ext[i])
302: q_conv_PO_ext[i]=h_P2_ext*(T_ext[i]-T_PO_ext[i])
303:
304: //Interior
305: q_conv_C_int[i]= h_int*(T_C_int[i]-T_amb[i])
306: q_conv_S_int[i]=h_int*(T_S[i]-T_amb[i])
307:
308: q_conv_PN_int[i]=h_int*(T_PN_int[i]-T_amb[i])
309: q_conv_PS_int[i]=h_int*(T_PS_int[i]-T_amb[i])
310: q_conv_PE_int[i]=h_int*(T_PE_int[i]-T_amb[i])
311: q_conv_PO_int[i]=h_int*(T_PO_int[i]-T_amb[i])
312:
313: "-----RADIACIÓN"
314: //Exterior
315:
316: G_solar_C[i]=G_difusa[i]+G_directa[i]
317: G_solar_PN[i]=tan(if(Cenit[i];90;Cenit[i];0;0)*Pi/180)*cos(alpha_PN[i]*Pi/180)*G_directa[i]
318: G_solar_PS[i]=tan(if(Cenit[i];90;Cenit[i];0;0)*Pi/180)*cos(alpha_PS[i]*Pi/180)*G_directa[i]
319: G_solar_PE[i]=tan(if(Cenit[i];90;Cenit[i];0;0)*Pi/180)*cos(alpha_PE[i]*Pi/180)*G_directa[i]
320: G_solar_PO[i]=tan(if(Cenit[i];90;Cenit[i];0;0)*Pi/180)*cos(alpha_PO[i]*Pi/180)*G_directa[i]
321:

```

```

322: alpha_PN[i]=if(abs(Azimut[i]-theta+180);90;abs(Azimut[i]-theta+180);abs(Azimut[i]-
theta+180);if(abs(Azimut[i]-theta+180)
;270;90;abs(Azimut[i]-theta+180);abs(Azimut[i]-theta+180)))
323:
324: alpha_PS[i]=if(abs(Azimut[i]-theta);90;abs(Azimut[i]-theta);abs(Azimut[i]-theta);if(abs(Azimut[i]-
theta);270;90;abs(Azimut[i]
-theta);abs(Azimut[i]-theta)))
325: alpha_PE[i]=if(abs(Azimut[i]-theta+90);90;abs(Azimut[i]-theta+90);abs(Azimut[i]-
theta+90);if(abs(Azimut[i]-theta+90);270;90
;abs(Azimut[i]-theta+90);abs(Azimut[i]-theta+90)))
326:
327: alpha_PO[i]=if(abs(Azimut[i]-theta-90);90;abs(Azimut[i]-theta-90);abs(Azimut[i]-theta-
90);if(abs(Azimut[i]-theta-90);270;90
;abs(Azimut[i]-theta-90);abs(Azimut[i]-theta-90)))
328:
329:
330: G_C_ext[i]= G_solar_C[i] + sigma#*(T_cielo[i])^4
331:
332: G_PN_ext[i]=G_solar_PN[i] + F_P1Cielo*(sigma#*(T_cielo[i])^4+ G_difusa[i]) +
F_P1T*(epsilon_T*sigma#*(T_PN_ext[i])^4
+rho_solar_T*G_solar_C[i] + rho_T*sigma#*(T_cielo[i])^4)
333: G_PS_ext[i]=G_solar_PS[i] + F_P1Cielo*(sigma#*(T_cielo[i])^4+ G_difusa[i]) +
F_P1T*(epsilon_T*sigma#*(T_PS_ext[i])^4
+rho_solar_T*G_solar_C[i] + rho_T*sigma#*(T_cielo[i])^4)
334: G_PE_ext[i]=G_solar_PE[i] + F_P2Cielo*(sigma#*(T_cielo[i])^4+ G_difusa[i]) +
F_P2T*(epsilon_T*sigma#*(T_PE_ext[i])^4
+rho_solar_T*G_solar_C[i] + rho_T*sigma#*(T_cielo[i])^4)
335: G_PO_ext[i]=G_solar_PO[i] + F_P2Cielo*(sigma#*(T_cielo[i])^4+ G_difusa[i]) +
F_P2T*(epsilon_T*sigma#*(T_PO_ext[i])^4
+rho_solar_T*G_solar_C[i] + rho_T*sigma#*(T_cielo[i])^4)
336:
337:
338: J_C_ext[i]=epsilon_C_ext*sigma#*(T_C_ext[i])^4 + rho_solar_C_ext*G_solar_C[i] +
rho_C_ext*sigma#*(T_cielo[i])^4
339:
340: J_PN_ext[i]=epsilon_P_ext*sigma#*(T_PN_ext[i])^4 + rho_solar_P_ext*G_solar_PN[i] + F_P1Cielo*(
rho_P_ext*sigma#
*(T_cielo[i])^4+ rho_solar_P_ext*G_difusa[i]) + F_P1T*(rho_P_ext*(epsilon_T*sigma#*(T_PN_ext[i])^4
+rho_T*sigma#
*(T_cielo[i])^4)+rho_solar_P_ext*rho_solar_T*G_solar_C[i])
341:
342: J_PS_ext[i]=epsilon_P_ext*sigma#*(T_PS_ext[i])^4 + rho_solar_P_ext*G_solar_PS[i] + F_P1Cielo*(
rho_P_ext*sigma#
*(T_cielo[i])^4+ rho_solar_P_ext*G_difusa[i]) + F_P1T*(rho_P_ext*(epsilon_T*sigma#*(T_PS_ext[i])^4
+rho_T*sigma#
*(T_cielo[i])^4)+rho_solar_P_ext*rho_solar_T*G_solar_C[i])
343:
344: J_PE_ext[i]=epsilon_P_ext*sigma#*(T_PE_ext[i])^4 + rho_solar_P_ext*G_solar_PE[i] + F_P1Cielo*(
rho_P_ext*sigma#
*(T_cielo[i])^4+ rho_solar_P_ext*G_difusa[i]) + F_P2T*(rho_P_ext*(epsilon_T*sigma#*(T_PE_ext[i])^4
+rho_T*sigma#
*(T_cielo[i])^4)+rho_solar_P_ext*rho_solar_T*G_solar_C[i])
345:
346: J_PO_ext[i]=epsilon_P_ext*sigma#*(T_PO_ext[i])^4 + rho_solar_P_ext*G_solar_PO[i] + F_P1Cielo*(
rho_P_ext*sigma#
*(T_cielo[i])^4+ rho_solar_P_ext*G_difusa[i]) + F_P2T*(rho_P_ext*(epsilon_T*sigma#*(T_PO_ext[i])^4
+rho_T*sigma#
*(T_cielo[i])^4)+rho_solar_P_ext*rho_solar_T*G_solar_C[i])
347:
348: q_rad_C_ext[i]=G_C_ext[i] - J_C_ext[i]
349:
350: q_rad_PN_ext[i]=G_PN_ext[i] - J_PN_ext[i]
351: q_rad_PS_ext[i]=G_PS_ext[i] - J_PS_ext[i]
352: q_rad_PE_ext[i]=G_PE_ext[i] - J_PE_ext[i]
353: q_rad_PO_ext[i]=G_PO_ext[i] - J_PO_ext[i]
354:
355:

```

```

356:
357: //Interior
358:
359: G_C_int[i]= F_CS*J_S_int[i] + F_CP1*J_PN_int[i] + F_CP1*J_PS_int[i] + F_CP2*J_PE_int[i]+
F_CP2*J_PO_int[i]
360: G_S_int[i]= F_SC*J_C_int[i] + F_SP1*J_PN_int[i] + F_CP1*J_PS_int[i]+ F_SP2*J_PE_int[i] +
F_SP2*J_PO_int[i]
361:
362: G_PN_int[i]= F_P1C*J_C_int[i] + F_P1S*J_S_int[i] + F_P1P1*J_PS_int[i] + F_P1P2*J_PE_int[i]+
F_P1P2*J_PO_int[i]
363: G_PS_int[i]= F_P1C*J_C_int[i] + F_P1S*J_S_int[i] + F_P1P1*J_PN_int[i] + F_P1P2*J_PE_int[i]+
F_P1P2*J_PO_int[i]
364: G_PE_int[i]= F_P2C*J_C_int[i] + F_P2S*J_S_int[i] + F_P2P1*J_PN_int[i] + F_P2P1*J_PS_int[i] +
F_P2P2*J_PO_int[i]
365: G_PO_int[i]= F_P2C*J_C_int[i] + F_P2S*J_S_int[i] + F_P2P1*J_PN_int[i] + F_P2P1*J_PS_int[i] +
F_P2P2*J_PO_int[i]
366:
367:
368: J_C_int[i]=epsilon_C_int*sigma#*(T_C_int[i])^4 + rho_C_int*G_C_int[i]
369: J_S_int[i]=epsilon_S*sigma#*(T_S[i])^4 + rho_S*G_S_int[i]
370:
371: J_PN_int[i]=epsilon_P_int*sigma#*(T_PN_int[i])^4 + rho_P_int*G_PN_int[i]
372: J_PS_int[i]=epsilon_P_int*sigma#*(T_PS_int[i])^4 + rho_P_int*G_PS_int[i]
373: J_PE_int[i]=epsilon_P_int*sigma#*(T_PE_int[i])^4 + rho_P_int*G_PE_int[i]
374: J_PO_int[i]=epsilon_P_int*sigma#*(T_PO_int[i])^4 + rho_P_int*G_PO_int[i]
375:
376:
377: q_rad_C_int[i]=J_C_int[i] - G_C_int[i]
378: q_rad_S_int[i]=J_S_int[i] - G_S_int[i]
379:
380: q_rad_PN_int[i]=J_PN_int[i] - G_PN_int[i]
381: q_rad_PS_int[i]=J_PS_int[i] - G_PS_int[i]
382: q_rad_PE_int[i]=J_PE_int[i] - G_PE_int[i]
383: q_rad_PO_int[i]=J_PO_int[i] - G_PO_int[i]
384:
385: " _____CALOR ACUMULADO"
386:
387: T_C[i]=(T_C_ext[i]+T_C_int[i])/2
388:
389: T_PN[i]=(T_PN_ext[i]+T_PN_int[i])/2
390: T_PS[i]=(T_PS_ext[i]+T_PS_int[i])/2
391: T_PE[i]=(T_PE_ext[i]+T_PE_int[i])/2
392: T_PO[i]=(T_PO_ext[i]+T_PO_int[i])/2
393:
394: Q_alm_C[i]=V_C*Densidad_C*C_C*(T_C[i]-T_C[i-1])
395: Q_alm_S[i]=V_S*Densidad_S*C_S*(T_S[i]-T_S[i-1])
396:
397: Q_alm_PN[i]=V_P1*Densidad_P*C_P*(T_PN[i]-T_PN[i-1])
398: Q_alm_PS[i]=V_P1*Densidad_P*C_P*(T_PS[i]-T_PS[i-1])
399: Q_alm_PE[i]=V_P2*Densidad_P*C_P*(T_PE[i]-T_PE[i-1])
400: Q_alm_PO[i]=V_P2*Densidad_P*C_P*(T_PO[i]-T_PO[i-1])
401:
402:
403:
404: "-----BALANCES TERMICOS"
405:
406: //Cubierta
407: q_rad_C_ext[i]+q_conv_C_ext[i] - q_cond_C[i] = Q_alm_C[i]/(t*A_C)
408: q_cond_C[i] = q_conv_C_int[i] + q_rad_C_int[i]
409:
410: //Suelo
411: - q_conv_S_int[i] - q_rad_S_int[i] = Q_alm_S[i]/(t*A_S)
412:
413: //Pared tipo P
414:
415: q_rad_PN_ext[i]+q_conv_PN_ext[i] - q_cond_PN[i] = Q_alm_PN[i]/(t*A_P1)
416: q_cond_PN[i] = q_conv_PN_int[i] + q_rad_PN_int[i]

```

```

417:
418: q_rad_PS_ext[i]+q_conv_PS_ext[i] - q_cond_PS[i] = Q_alm_PS[i]/(t*A_P1)
419: q_cond_PS[i] = q_conv_PS_int[i] + q_rad_PS_int[i]
420:
421: q_rad_PE_ext[i]+q_conv_PE_ext[i] - q_cond_PE[i] = Q_alm_PE[i]/(t*A_P2)
422: q_cond_PE[i] = q_conv_PE_int[i] + q_rad_PE_int[i]
423:
424: q_rad_PO_ext[i]+q_conv_PO_ext[i] - q_cond_PO[i] = Q_alm_PO[i]/(t*A_P2)
425: q_cond_PO[i] = q_conv_PO_int[i] + q_rad_PO_int[i]
426:
427:
428: " _____ VENTILACIÓN"
429:
430: Q_vent[i]=Renovaciones*V*Densidad_air*Cp_air*(T_amb[i]-T_ext[i])
431:
432: " _____ CARGAS INTERNAS"
433:
434:
f_qsensible[i]=if(T_amb[i];21,f_qsensible_21,f_qsensible_21;if(T_amb[i];28,f_qsensible_25,f_qsensible_28;
if(T_amb[i];36
,f_qsensible_28,f_qsensible_28;0)))
435:
q_ocup[i]=if(Hora[i];Hora_inicio;0;q_personas;if(Hora[i];Hora_fin;q_personas;0;0))*f_qsensible[i]*n_person
as
436: q_ocup_lat[i]=if(Hora[i];Hora_inicio;0;q_personas;if(Hora[i];Hora_fin;q_personas;0;0))*(1-
f_qsensible[i])*n_personas
437:
438:
439: q_illum[i]=if(Hora[i];Hora_inicio;0;q_illum;if(Hora[i];Hora_fin;q_illum;0;0))*n_illum
440: q_maq[i]=if(Hora[i];Hora_inicio;0;q_maq;if(Hora[i];Hora_fin;q_maq;0;0))
441: q_elec[i]=if(Hora[i];Hora_inicio;0;q_elec;if(Hora[i];Hora_fin;q_elec;0;0))
442: q_otros[i]=if(Hora[i];Hora_inicio_otros;0;q_otros;if(Hora[i];Hora_fin_otros;q_otros;0;0))
443:
444: q_Cl[i]=q_ocup[i]+q_illum[i]+q_maq[i]+q_elec[i]+q_otros[i]
445:
446:
447: " _____ BALANCE DE ENERGIA GLOBAL"
448:
449:
450: Q_alm[i]=V*Densidad_air*Cp_air*(T_amb[i]-T_amb[i-1])
451:
452: (Q_alm[i]+Q_vent[i])/t = q_conv_C_int[i]*A_C + (q_S[i]+q_conv_S_int[i])*A_S + (q_conv_PN_int[i] +
q_conv_PS_int[i])*A_P1
+ (q_conv_PE_int[i] + q_conv_PO_int[i])*A_P2 + q_Cl[i]
453:
454:
455: " _____ CLIMATIZACIÓN"
456:
457: Q_vent_lat[i]=Renovaciones*V*Densidad_air*h_fg_air*(w_ext[i]-w_amb)
458:
459:
q_refri[i]=(if(Hora[i];Hora_inicio;0;if(T_ambiente[i];T_AC;0;0;(1+Renovaciones)*V*Densidad_air*Cp_air*(T_
ambiente[i]-T_AC
));if(Hora[i];Hora_fin;if(T_ambiente[i];T_AC;0;0;(1+Renovaciones)*V*Densidad_air*Cp_air*(T_ambiente[i]-
T_AC));0;0)))
/(1000*t)+q_ocup_lat[i]/1000+Q_vent_lat[i]/(1000*t)
460:
461:
q_calef[i]=if(Hora[i];Hora_inicio;0;if(T_ambiente[i];T_AC;(1+Renovaciones)*V*Densidad_air*Cp_air*(T_AC-
T_ambiente[i]);0
);if(Hora[i];Hora_fin;if(T_ambiente[i];T_AC;(1+Renovaciones)*V*Densidad_air*Cp_air*(T_AC-
T_ambiente[i]);0;0);0;0))
(1000*t)
462:
463: " _____ CONVERSIÓN DE TEMPERATURAS"
464:
465: T_ambiente[i]=T_amb[i]-273

```

```
466: T_exterior[i]=T_ext[i]-273
467:
468:
469: T_AC[i]=if(Hora[i];Hora_inicio;T_ambiente[i];T_AC;if(Hora[i];Hora_fin;T_AC;T_ambiente[i];T_ambiente[i]))
470:
471: End
472:
473: " _____ RESULTADOS"
474:
475: //Refrigeración
476: Q_refri=sum(q_refri[25..48])
477: q_maq_refri=sum(q_refri[39..40])/2
478:
479: //Calefacción
480: RR=Hora_inicio+24
481: TT=Hora_inicio+26
482: GG=Hora_fin+24
483: Q_calef=sum(q_calef[25..48])
484: q_maq_calef=sum(q_calef[RR..TT])/2
485:
486: //Temperaturas
487: T_amb_MAX=max(T_ambiente[25..48])
488: T_amb_MED=average(T_ambiente[RR..GG])
489: T_amb_MIN=min(T_ambiente[RR..GG])
490:
```


ANEXO B

En el siguiente anexo encontraremos los datos introducidos (lookup table) en el entorno EES para la realización del programa.

Lookup Table: Materiales

	Chapa de Aluminio	Chapa de Acero	Panel Sandwich - PUR	Panel Sandwich - PIR
Row 1	2700	7800	45	40
Row 2	880	450	1000	1000
Row 3	230	50	0,031	0,021

Lookup Table: Materiales

	Panel Sandwich - Lana de roca	Panel Sandwich - Fibra de vidrio	Bloque de hormigón	Otro
Row 1	40	35	1200	1
Row 2	1000	1000	1000	1
Row 3	0,038	0,045	0,3	1

Lookup Table: Acabado superficial

	Pintura - Rojo claro	Pintura - Rojo oscuro	Pintura - Verde claro	Pintura - Verde oscuro
Row 1	0,9	0,9	0,9	0,9
Row 2	0,55	0,25	0,55	0,25

Lookup Table: Acabado superficial

	Pintura - Negro	Pintura - Blanco	Chapa galvanizada	Aluminio pulido	Acero pulido
Row 1	0,95	0,9	0,28	0,05	0,7
Row 2	0,08	0,78	0,6	0,85	0,65

Lookup Table: Acabado superficial

	Hormigón	Lámina asfáltica	COOL-R	Otro
Row 1	0,93	0,95	0,85	1
Row 2	0,3	0,1	0,857	1

Lookup Table: Metabolismo

	Sentado en reposo	Trabajo muy ligero	Trabajo ligero	Trabajo moderado	Trabajo intenso
Row 1	115	150	200	300	400

Lookup Table: Metabolismo

	Trabajo muy intenso
Row 1	500

Lookup Table: Madrid Ver (D3)

	Mes	Dia	Hora	Temp seca	Temp cielo	Rad directa	Rad difusa	Hum abs	Hum rel
Row 1	7	26	1	22,6	11,91	0	0	0,008902	48,13
Row 2	7	26	2	22,2	11,31	0	0	0,008963	49,65
Row 3	7	26	3	21,6	10,47	0	0	0,008944	51,39
Row 4	7	26	4	20,7	9,257	0	0	0,008848	53,74
Row 5	7	26	5	21,5	9,57	0	0	0,008682	50,21
Row 6	7	26	6	21,3	8,751	48	46	0,00846	49,55
Row 7	7	26	7	22,3	8,794	189	82	0,008197	45,18
Row 8	7	26	8	22,7	7,752	356	100	0,007913	42,59
Row 9	7	26	9	24,5	9,334	516	110	0,007628	36,85
Row 10	7	26	10	25,5	10,16	687	95	0,007363	33,53
Row 11	7	26	11	27,2	12,68	679	156	0,007138	29,41
Row 12	7	26	12	28,5	12,81	794	122	0,006968	26,62
Row 13	7	26	13	29,2	13,43	850	92	0,006867	25,2
Row 14	7	26	14	30,2	14,36	777	102	0,006842	23,7
Row 15	7	26	15	29,8	15,03	611	137	0,006896	24,44
Row 16	7	26	16	29,7	13,98	482	128	0,007027	25,05
Row 17	7	26	17	28,9	13,32	323	117	0,007227	26,97
Row 18	7	26	18	28,3	12,87	178	88	0,007482	28,9
Row 19	7	26	19	26,7	11,49	43	49	0,007777	32,97
Row 20	7	26	20	25,5	10,49	0	0	0,008092	36,81
Row 21	7	26	21	24,4	9,575	0	0	0,008407	40,81
Row 22	7	26	22	23,7	9,028	0	0	0,008701	44,03
Row 23	7	26	23	23,2	8,652	0	0	0,008956	46,69
Row 24	7	26	24	22,7	8,251	0	0	0,009153	49,17
Row 25	7	27	1	22	7,633	0	0	0,009282	52,02
Row 26	7	27	2	21,2	6,891	0	0	0,009333	54,92
Row 27	7	27	3	20,5	6,214	0	0	0,009304	57,17
Row 28	7	27	4	19,3	5,034	0	0	0,009198	60,89
Row 29	7	27	5	19,2	4,874	0	0	0,009023	60,12
Row 30	7	27	6	19,7	5,26	42	50	0,00879	56,8
Row 31	7	27	7	20,5	5,914	181	88	0,008518	52,4
Row 32	7	27	8	21,5	6,744	345	109	0,008224	47,6
Row 33	7	27	9	23,2	8,234	517	112	0,007929	41,4
Row 34	7	27	10	24,8	9,631	677	104	0,007654	36,32
Row 35	7	27	11	26,2	10,85	799	93	0,007419	32,41
Row 36	7	27	12	27,8	12,28	866	85	0,007238	28,79
Row 37	7	27	13	29	13,37	866	85	0,007127	26,44
Row 38	7	27	14	30,1	14,39	799	93	0,007091	24,7
Row 39	7	27	15	29,8	14,13	677	104	0,007134	25,28
Row 40	7	27	16	29,7	14,09	517	112	0,007254	25,85
Row 41	7	27	17	28,8	13,33	345	109	0,007442	27,92
Row 42	7	27	18	27,5	12,44	181	88	0,007685	31,09
Row 43	7	27	19	25,8	11,17	42	50	0,007968	35,61
Row 44	7	27	20	24,9	10,64	0	0	0,008272	38,98

Lookup Table: Madrid Ver (D3)

	Mes	Dia	Hora	Temp seca	Temp cielo	Rad directa	Rad difusa	Hum abs	Hum rel
Row 45	7	27	21	23,6	9,711	0	0	0,008575	43,66
Row 46	7	27	22	22,6	9,039	0	0	0,008857	47,89
Row 47	7	27	23	21,8	8,527	0	0	0,009099	51,63
Row 48	7	27	24	21,4	8,362	0	0	0,009285	53,98

Lookup Table: Madrid Ver (D3)

	Vel viento	Dir viento	Azimut	Cenit
Row 1	2,375	0	0	90
Row 2	2,374	0	0	90
Row 3	2,374	0	0	90
Row 4	2,374	0	0	90
Row 5	2,374	0	-115,2	89,1
Row 6	2,374	0	-109,7	82,9
Row 7	2,374	0	-100,6	71,9
Row 8	2,374	0	-91,3	60,6
Row 9	2,373	0	-81,1	49,2
Row 10	2,373	0	-68,1	38,2
Row 11	2,373	0	-49,3	28,4
Row 12	2,373	0	-19,3	21,9
Row 13	2,373	0	19,3	21,9
Row 14	2,373	0	49,3	28,4
Row 15	2,373	0	68,1	38,2
Row 16	2,373	0	81,1	49,2
Row 17	2,372	0	91,3	60,6
Row 18	2,372	0	100,6	71,9
Row 19	2,372	0	109,7	82,9
Row 20	2,372	0	115,2	89,1
Row 21	2,372	0	0	90
Row 22	2,372	0	0	90
Row 23	2,372	0	0	90
Row 24	2,371	0	0	90
Row 25	2,371	0	0	90
Row 26	2,371	0	0	90
Row 27	2,371	0	0	90
Row 28	2,371	0	0	90
Row 29	2,371	0	-115	89,2
Row 30	2,371	0	-109,5	83,1
Row 31	2,371	0	-100,4	72,1
Row 32	2,37	0	-91,1	60,7
Row 33	2,37	0	-80,8	49,3
Row 34	2,37	0	-67,8	38,3
Row 35	2,37	0	-49	28,6
Row 36	2,37	0	-19,1	22,1
Row 37	2,37	0	19,1	22,1
Row 38	2,37	0	49	28,6
Row 39	2,369	0	67,8	38,3
Row 40	2,369	0	80,8	49,3
Row 41	2,369	0	91,1	60,7
Row 42	2,369	0	100,4	72,1
Row 43	2,369	0	109,5	83,1
Row 44	2,369	0	115	89,2
Row 45	2,369	0	0	90
Row 46	2,369	0	0	90
Row 47	2,368	0	0	90
Row 48	2,368	0	0	90

